

Université de Sherbrooke

Faculté de Génie

Département Génie Civil

MÉTHODES ACOUSTIQUES NON LINÉAIRES POUR LA CARACTÉRISATION DE
L'ENDOMMAGEMENT MULTIPLE (RAS, SULFATE, THERMIQUE) DES BÉTONS

Mémoire de maîtrise

Spécialité Génie Civil

Samuel FAUCON

Membres du jury d'examen :

Patrice RIVARD, directeur de recherche

Richard GAGNÉ, rapporteur

Leandro SANCHEZ

Résumé

L'acoustique non linéaire (ANL) est une méthode de caractérisation non destructive développée dans les laboratoires dans le but de diagnostiquer le plus tôt possible les dégradations du béton. Des recherches démontrent une plus grande sensibilité de cette méthode pour diagnostiquer les prémisses des endommagements dans le béton. Les méthodes ANL privilégiées dans ce travail sont NIRAS (*Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy*) et NRUS (*Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy*).

Cependant, ces méthodes sont au stade de développement et sont très peu utilisées en dehors des laboratoires. Il y a donc une nécessité d'amplifier l'expérimentation de ces méthodes pour connaître leur efficacité pour une plus large utilisation dans le cas de structures en béton. Bien que les méthodes ANL aient été étudiées sur différents types d'endommagement comme la RAG et les attaques sulfatiques, très peu d'études ont porté sur la pertinence de ces méthodes vis-à-vis la caractérisation du béton suite à plusieurs endommagements simultanés. Ce projet a pour but d'étudier les performances de ces méthodes ANL en vue de les valider pour une approche multi-endommagement dans le béton.

Les types d'endommagement choisis sont la RAG, ESA et le choc thermique. Ces endommagements ont été choisis car leur développement peut être précisément contrôlé en laboratoire afin d'avoir des niveaux d'endommagement d'intensité similaire.

Le programme expérimental comportait la fabrication de trois types de bétons : un premier de référence, un second développant la RAG, un dernier qui a été exposé aux sulfates externes. 58 éprouvettes cylindriques (100*200mm) et 12 prismatiques (75*75*300mm) ont été produites dans le cas des endommagements RAS et ESA. 44 éprouvettes cylindriques et 12 prismatiques dans le cas des éprouvettes de référence. La moitié des éprouvettes produites avec chaque béton ont subi un choc thermique. Des mesures ont été faites pour chaque combinaison d'endommagement avec les deux méthodes ANL. Les paramètres étudiés sont la variation de fréquence de résonance des éprouvettes et le coefficient de non-linéarité α du matériau. Les données ont été complétées par des mesures de masse, d'allongement et de vitesse ultrasonore (*Ultrasonic Pulse Velocity : UPV*), ainsi que par un examen pétrographique avec la méthode du DRI (*Damage Rating Index*) et des observations au microscope électronique à balayage. Les conclusions de ce projet sont les suivantes :

- La méthode NRUS nécessite une durée de préparation des échantillons plus importante pour réduire la présence d'eau dans le béton provenant du milieu de stockage.
- La présence d'humidité de l'échantillon affecte le coefficient de non-linéarité α . Elle le réduit donnant des valeurs similaires à des éprouvettes non endommagées.
- La méthode NIRAS permet de suivre la dégradation des différents bétons, quelles que soient les combinaisons d'endommagements.
- Les méthodes ANL n'ont pas permis dans cette étude un diagnostic en amont de la méthode UPV.

Mots clés : acoustique non linéaire, endommagements combinés, attaque sulfatique externe, réaction alcalis-granulats, choc thermique

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes qui ont permis à ce projet de voir le jour.

Je remercie le professeur Patrice RIVARD. Je lui suis reconnaissant de m'avoir intégré à son laboratoire.

Un grand merci à Jean-Louis GALLIAS. Merci pour ses conseils et la confiance accordée dans les différentes collaborations.

Merci à Apedovi Serge KODJO pour son expertise et aide dans l'analyse des données acoustiques.

Je remercie Ghislaine LUC et Danick CHARBONNEAU pour leur patience et aide sans fin dans la réalisation du protocole expérimental.

Merci à l'équipe du laboratoire, à Ghasem SHAMS, Nicolas NERON, Mahmoud LEFEDHIL, Jihene BEN ABDELJELIL, Mohammed CHERIF, Amine EL MAHDI SAFHI et spécialement Adrien RULLIERE. Merci à chacun d'entre vous pour les échanges constructifs et les moments partagés.

Je remercie de même le département Génie Civil de l'Université de Sherbrooke. Merci à la bibliothèque R. Howard Webster de l'Université Concordia pour son accueil.

Merci à mes parents, ma sœur et mes frères pour leur appui constant depuis le début.

Finalement, merci à Emily pour sa patience et son soutien continu.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
2.1	Réaction Alcalis-Granulat	5
2.2	Les Attaques Sulfatiques.....	8
2.2.1	Mécanismes de réaction.....	8
2.2.2	Réaction Sulfatique Interne.....	9
2.2.3	Attaque Sulfatique Externe	14
2.3	Combinaison d'endommagements	15
2.4	Contrôle Non Destructif.....	17
2.4.1	Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	17
2.4.2	Damage Rating Index (DRI).....	19
2.4.3	Acoustique Non Linéaire.	20
3	MÉTHODOLOGIE	26
3.1	Production des bétons et des endommagements	27
3.2	Matériaux des mélanges.....	28
3.2.1	Ciment.....	28
3.2.2	Granulats.....	29
3.2.3	Sable	30
3.2.4	Eau	30
3.2.5	NaOH.....	30
3.2.6	Sulfate de Sodium	31
3.3	Quantités des mélanges	31
3.4	Fabrication.....	33
3.5	Conditions de conservation.....	33
3.5.1	Conservation du béton de référence et endommagé thermiquement.....	33
3.5.2	Conservation du béton développant la RAS	33
3.5.3	Conservation du béton exposé aux sulfates	34
3.6	Protocole d'endommagement thermique	36
3.7	Caractérisation des endommagements	36

3.8	Essais destructifs	37
3.9	Essais non destructifs	37
3.9.1	Suivi de masse et de l'allongement	38
3.9.2	Damage Rating Index	38
3.9.3	Microscope Électronique à Balayages (MEB)	39
3.9.4	Vitesse de propagation des ondes de compression.....	39
3.9.5	Acoustique non linéaire – NRUS.....	40
3.9.6	Acoustique non linéaire – NIRAS	42
4	RÉSULTATS	44
4.1	Essais conventionnels	44
4.1.1	Masse	44
4.1.2	Allongement.....	47
4.1.3	Résistance à la compression.....	53
4.1.4	Module d'Young.....	54
4.1.5	Résistance à la traction.....	56
4.2	Essais non destructifs	58
4.2.1	UPV	58
4.2.2	NIRAS	62
4.2.3	NRUS.....	83
4.2.4	Observations au MEB	105
4.2.5	Damage Rating Index	107
5	DISCUSSION.....	110
5.1	Comparaison des méthodes NIRAS et NRUS.....	110
5.2	Suivi de la combinaison d'endommagement par méthodes acoustiques non linéaires	113
5.2.1	ESA.....	113
5.2.2	REF.....	114
5.2.3	RAS.....	115
6	CONCLUSION.....	116
7	BIBLIOGRAPHIE	120
8	ANNEXES.....	126
8.1	Annexe n°1 - Microscope Électronique à Balayage.....	126

8.2	Annexe n°2 - Résultats de l'essai NIRAS pour les éprouvettes REF.	139
8.3	Annexe n°3 - Résultats de l'essai NRUS pour les éprouvettes REF.	140
8.4	Annexe n°4 - Résultats de l'essai NIRAS pour les éprouvettes RAS.	141
8.5	Annexe n°5 - Résultats de l'essai NRUS pour les éprouvettes RAS.	142
8.6	Annexe n°6 - Résultats de l'essai NIRAS pour les éprouvettes ESA.	143
8.7	Annexe n°7 - Résultats de l'essai NRUS pour les éprouvettes ESA.	144
8.8	Annexe n°8 - Résultats des résistances à la compression aux différentes échéances.	145
8.9	Annexe n°9 - Résultats des modules de Young aux différentes échéances.	148
8.10	Annexe n°10 - Résultats des résistances à la traction aux différentes échéances.	150
8.11	Annexe n°11 – Détails du ciment GU.	152

Liste des figures

Figure 2.1 - Fissuration de surface http://www.qtechndtins.com/	5
Figure 2.2 - Facteurs nécessaires au développement de la Formation d'Ettringite Différée [21]	11
Figure 2.3 - Contrôle Non Destructif (mesure des vitesses ultrasonores en transmission directe) http://www.european-coatings.com/	18
Figure 3.1 - Identification des bétons selon les modes d'endommagement ciblés	28
Figure 3.2 - Répartition de la production du béton en fonction des endommagements à réaliser	32
Figure 3.3 - Résumé des conditions de conservation pour les éprouvettes RAS	34
Figure 3.4 - Résumé des conditions de conservation pour les éprouvettes ESA	35
Figure 3.5 - Schéma de l'appareillage pour les mesures de vitesse de propagation des ondes de compressions	40
Figure 3.6 - Configuration de l'essai NIRAS pour les modes transversaux (a) et longitudinaux (b) (ASTM C215)	43
Figure 4.1 - Évolution de la masse des éprouvettes de référence	45
Figure 4.2 - Évolution de la masse des éprouvettes RAS	46
Figure 4.3 - Évolution de la masse des éprouvettes ESA	47
Figure 4.4 - Évolution de l'allongement des éprouvettes de référence (préchoc thermique)	48
Figure 4.5 - Évolution de l'allongement des éprouvettes de référence (post-choc thermique).....	49
Figure 4.6 - Évolution de l'allongement des éprouvettes RAS (préchoc thermique)	50
Figure 4.7 - Évolution de l'allongement des éprouvettes RAS (post-choc thermique)	51
Figure 4.8 - Évolution de l'allongement des éprouvettes ESA.....	52
Figure 4.9 - Évolution de la résistance à la compression moyenne pour les éprouvettes de référence.....	53
Figure 4.10 - Évolution de la résistance à la compression moyenne pour les éprouvettes RAS	54
Figure 4.11 - Évolution du module d'Young en fonction du temps pour les éprouvettes de référence	55
Figure 4.12 - Évolution du module d'Young en fonction du temps pour les éprouvettes RAS	55
Figure 4.13 - Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps pour les éprouvettes de référence.....	57
Figure 4.14 - Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps pour les éprouvettes RAS	57
Figure 4.15 - Évolution de la vitesse de propagation des ondes de compression (UPV) des éprouvettes de référence	59
Figure 4.16 - Évolution de la vitesse de propagation des ondes de compression (UPV) des éprouvettes RAS	60
Figure 4.17 - Évolution de la vitesse de propagation des ondes de compression (UPV) des éprouvettes ESA	62
Figure 4.18 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 56 jours (NIRAS- REF-PCT2).....	63
Figure 4.19 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 322 jours (NIRAS-REF-PCT2).....	64
Figure 4.20 - Évolution du paramètre α entre 56 et 322 jours (NIRAS-REF-PCT2)	64

Figure 4.21 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 56 jours (NIRAS- REF-CT2).....	65
Figure 4.22 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 266 jours (NIRAS- REF-CT2).....	66
Figure 4.23 - Évolution du paramètre α entre 56 et 322 jours (NIRAS-REF-CT2)	66
Figure 4.24 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 98 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-PCT1).....	71
Figure 4.25 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 324 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-PCT1).....	71
Figure 4.26 - Évolution du paramètre α entre 98 et 324 jours (NIRAS-RAS-PCT1).....	72
Figure 4.27 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 98 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-CT2).....	73
Figure 4.28 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 324 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-CT2).....	73
Figure 4.29 - Évolution du paramètre α entre 98 et 324 jours (NIRAS-RAS-CT2).....	74
Figure 4.30 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 28 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-PCT3).....	78
Figure 4.31 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-PCT3).....	78
Figure 4.32 - Évolution du paramètre α à 28, 119 et 127 jours (ESA-PCT3).....	79
Figure 4.33 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 28 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-CT1)	80
Figure 4.34 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-CT1)	80
Figure 4.35 - Évolution du paramètre α à 28, 119 et 127 jours (ESA-CT1).....	81
Figure 4.36 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 64 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-PCT1).....	84
Figure 4.37 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 237 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-PCT1).....	85
Figure 4.38 - Évolution du paramètre α à 64 et 237 jours (REF-PCT1).....	85
Figure 4.39 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 64 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-CT1)	86
Figure 4.40 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 237 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-CT1)	87
Figure 4.41 - Évolution du paramètre α à 64 et 237 jours (REF-CT1).....	87
Figure 4.42 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 106 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-PCT3).....	92

Figure 4.43 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 297 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-PCT3)	93
Figure 4.44 - Évolution du paramètre α à 106 et 297 jours (RAS-PCT3)	93
Figure 4.45 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 106 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-CT3)	94
Figure 4.46 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 297 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-CT3)	95
Figure 4.47 - Évolution du paramètre α à 106 et 297 jours (RAS-CT3)	95
Figure 4.48 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 27 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-PCT2)	99
Figure 4.49 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-PCT2)	100
Figure 4.50 - Évolution du paramètre α à 27, 119 et 127 jours (ESA-PCT2).....	100
Figure 4.51 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 27 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-CT3).....	101
Figure 4.52 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-CT3).....	102
Figure 4.53 - Évolution du paramètre α à 27, 119 et 127 jours (ESA-CT3).....	102
Figure 4.54 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon d'une éprouvette REF-CT à 34 semaines.	106
Figure 4.55 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon d'une éprouvette RAS-CT à 44 semaines.	107
Figure 4.56 – Valeurs des DRI en fonction des indices pétrographiques pour des éprouvettes CT et PCT des endommagements REF et RAS.....	109
Figure 5.1 - Variation de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'éprouvette REF - CT2 avec la méthode NRUS 52 semaines après le gâchage.	111
Figure 5.2 - Variation de l'amplitude en fonction de la fréquence après une semaine de séchage pour l'éprouvette REF - CT2 avec la méthode NRUS 53 semaines après le gâchage.....	112
Figure 8.1 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines	127
Figure 8.2 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines	128
Figure 8.3 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines	128
Figure 8.4 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT2 à 44 semaines	129
Figure 8.5 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT2 à 44 semaines	129

Figure 8.6 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
RAS-CT2 à 44 semaines	130
Figure 8.7 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
RAS-PCT1 à 44 semaines.....	131
Figure 8.8 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
RAS-PCT1 à 44 semaines.....	131
Figure 8.9 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
RAS-PCT2 à 44 semaines.....	132
Figure 8.10 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-PCT1 à 34 semaines.	133
Figure 8.11 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-PCT1 à 34 semaines	133
Figure 8.12 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-PCT1 à 34 semaines.	134
Figure 8.13 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-CT1 à 34 semaines.	134
Figure 8.14 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-CT1 à 34 semaines	135
Figure 8.15 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-CT1 à 34 semaines	135
Figure 8.16 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-CT2 à 34 semaines	136
Figure 8.17 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette	
REF-CT2 à 34 semaines	136

Liste des tableaux

Tableau 2.1 - Indices pétrographiques et facteurs de la méthode de Villeneuve [51]	20
Tableau 3.1 - Analyse pétrographique de granulats dont un Placitas [66]	29
Tableau 3.2 – Formulation du béton atteint de la réaction alcalis-silice (gâchée n°1) et des autres bétons	32
Tableau 3.3 - Normes utilisées pour la réalisation des essais destructifs	37
Tableau 3.4 - Résumé des balayages fréquentiels réalisés lors de l'essai NRUS.....	41
Tableau 4.1 - Résistance à la compression des éprouvettes ESA à 28 jours	54
Tableau 4.2 - Module d'Young des éprouvettes ESA à 28 jours	56
Tableau 4.3 - Résistance à la traction indirecte des éprouvettes ESA à 28 jours	58
Tableau 4.4 - Variation des fréquences de résonnances des éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 56j, Pre CT = 112j, Post CT = 133j et Finale = 322j).	69
Tableau 4.5 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 56j, Pre CT = 112j, Post CT = 133j et Finale = 322j).	70
Tableau 4.6 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 98j, Pre CT = 119j, Post CT = 126j et Finale = 324j).....	76
Tableau 4.7 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 98j, Pre CT = 119j, Post CT = 126j et Finale = 324j).	77
Tableau 4.8 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 28j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).....	82
Tableau 4.9 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 28j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).....	83
Tableau 4.10 - Variation des fréquences de résonance pour les éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 64j, Pre CT = 105j, Post CT = 126j et Finale = 336j)..	90
Tableau 4.11 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 64j, Pre CT = 105j, Post CT = 126j et Finale = 336j).....	91
Tableau 4.12 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 106j, Pre CT = 119j, Post CT = 140j et Finale = 297j).....	97
Tableau 4.13 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 106j, Pre CT = 119j, Post CT = 140j et Finale = 297j).....	98
Tableau 4.14 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 27j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).	104
Tableau 4.15 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 27j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).....	105
Tableau 5.1 - Valeurs obtenues avant et après le séchage de l'éprouvette REF - CT2 lors de l'essai complémentaire avec la méthode NRUS	112
Tableau 8.1 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 28 jours	145

Tableau 8.2 - Résistance à la compression des échantillons de référence à 27 semaines	145
Tableau 8.3 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 34 semaines	146
Tableau 8.4 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 40 semaines	146
Tableau 8.5 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 44 semaines	147
Tableau 8.6 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 28 jours	148
Tableau 8.7 - Module d'Young des échantillons de référence à 27 semaines	148
Tableau 8.8 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 34 semaines	149
Tableau 8.9 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 40 semaines	149
Tableau 8.10 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 44 semaines	149
Tableau 8.11 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence, RAS et ESA à 28 jours	150
Tableau 8.12 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence et RAS à 34 semaines	150
Tableau 8.13 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence et RAS à 40 semaines	151
Tableau 8.14 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence et RAS à 44 semaines	151

1 INTRODUCTION

La durabilité du béton est un sujet majeur dans le monde entier, car le béton est utilisé en grande quantité et que les coûts liés aux réparations sont très importants [1]. Ces problèmes de durabilité varient en fonction de la localisation des ouvrages et de leur utilisation. La dégradation des structures est liée aussi bien aux charges qui s'appliquent sur eux à cause de leur utilisation, qu'à leurs conditions d'exposition.

L'atteinte à l'intégrité structurale d'un ouvrage se manifeste principalement par l'apparition de fissures. Celles-ci se développent au fur et à mesure que la structure se dégrade, elles se répandent et atteignent l'ouvrage ou une section de celui-ci de manière globale. De plus, leur ouverture s'accroît jusqu'à parfois séparer des éléments. Il y a donc une première étape qui est la microfissuration et une deuxième qui est la macrofissuration. Notons qu'il peut y avoir, dans certains cas, de l'endommagement sans fissures visibles à la surface de l'ouvrage. Ces fissurations dans le béton peuvent être causées par des endommagements chimiques ayant lieu entre les différents matériaux du béton (ciment, pierres, sable, eau, adjuvants et ajouts cimentaires) voire entre ces matériaux et ceux de leur environnement extérieur comme les sols dans le cas des fondations ou les sels marins pour un ouvrage côtier.

La réaction alcalis-granulats et les attaques sulfatiques (interne et externe), générant toutes deux les gonflements internes du béton, sont des réactions chimiques correspondant à cette précédente description. Elles provoquent tout d'abord une microfissuration dans le matériau puis une macrofissuration.

L'endommagement thermique cyclique est de même problématique. Ce sont les grandes variations de température le long de l'année et les cycles de gel / dégel qui engendrent un endommagement prématuré des structures. Certaines zones géographiques sont plus affectées que d'autres. La province du Québec au Canada en est un exemple.

Le défi face à ces endommagements consiste à obtenir l'information à propos de leur évolution, soit leur vitesse de développement et leur amplitude. Cette information permet de programmer

des plans de surveillance et d'entretien des structures afin d'optimiser les travaux de réparation et ainsi conserver leur durée de vie utile, voire de l'augmenter. Il est donc nécessaire de caractériser ces endommagements.

Les méthodes de caractérisation des propriétés mécaniques du béton les plus communes sont les méthodes dites destructives. Cependant, elles peuvent souvent être dommageables pour les structures existantes, car il est nécessaire de faire des extractions de matière, des carottages. De plus, il n'est pas possible de mesurer les propriétés deux fois au même endroit. De plus, le monde de la recherche se concentre sur des problématiques ayant pour objectifs d'avoir des informations complémentaires par rapport aux méthodes destructives. C'est le cas aussi d'industriels proposant de nouveaux services et produits dans ce sens. Le Contrôle Non Destructif (CND) est un moyen innovant et complémentaire qui permet d'avoir des informations plus précises sur les endommagements. De plus, il permet de répéter les mesures au cours du temps sur la même zone étudiée.

Dans le cas de la RAG et des attaques sulfatiques externes, les méthodes de CND sont couramment utilisées dans les laboratoires afin de compléter les études. Cependant, ce n'est pas le cas (ou très peu) pour les industriels dans le cas d'étude sur le terrain. Les raisons à cela peuvent être le manque d'expertise des industriels dans ce domaine et la complexité de mise en place de ces méthodes sur des ouvrages réels (acquisition de matériels onéreux, formation de personnel, volume d'investigation plus grand, etc.).

Il existe plusieurs méthodes de caractérisation non destructives dans le cas du béton, voici quelques exemples:

- Méthodes mécaniques : méthode du marteau rebondissant [2], résistance à la pénétration [3]
- Méthodes électriques [4]
- Méthodes électro-chimiques [5]
- Méthodes acoustiques

Parmi les méthodes de caractérisations acoustiques, on distingue l'acoustique linéaire et non linéaire. L'acoustique linéaire a pour but d'envoyer une onde acoustique dans le matériau à

caractériser sans modifier les propriétés mécaniques de celui-ci. À l'inverse, les méthodes d'acoustique non linéaire émettent des ondes acoustiques qui modifient les propriétés mécaniques intrinsèques du matériau [6].

L'acoustique non linéaire permettrait une analyse plus précise comparativement aux autres méthodes acoustiques. En effet, les méthodes seraient plus sensibles que les méthodes linéaires [7] [8]. Les méthodes d'acoustique non linéaire souvent mentionnées dans la littérature sont la NRUS (*Nonlinear Resonance Ultrasound Spectroscopy*) [9] et NIRAS (*Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy*)[10].

Cependant, les conditions d'expositions et d'endommagements des structures sont différentes de celles des laboratoires. Les structures sont généralement exposées à plus qu'un seul type d'endommagement et leur dégradation est le fruit de la combinaison, à divers degrés, de plusieurs d'entre eux. Ainsi, l'étude en laboratoire d'un seul type d'endommagement semble « *incomplète* » face aux réalités des infrastructures existantes. Face à ce constat, notre étude a pour axe majeur la dégradation du béton par combinaison de type d'endommagement. Nous avons retenu les suivants: Réaction Alcalis-Silice (RAS), Attaque Sulfatique Externe (ESA) et choc thermique. Les deux premiers sont des endommagements majeurs dans la recherche sur les problématiques de durabilité dans les ouvrages en béton, car on les retrouve fréquemment sur plusieurs types d'ouvrages dans le monde. Ils présentent des caractéristiques plutôt similaires en termes de microfissuration et d'allongement. De plus, le choix d'un choc thermique permet d'avoir un endommagement additionnel avec une microfissuration sans produit de réaction à l'intérieur des fissures. Compte tenu de la sensibilité des méthodes avec l'acoustique non linéaire, le but de ce projet de recherche est d'évaluer la performance de celles-ci avec des combinaisons d'endommagements.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire avait pour but de répondre à plusieurs questions :

- Comment la réalisation d'un choc thermique affecte-t-elle le développement de la réaction alcalis-silice et de l'attaque sulfatique externe?
- Existe-t-il une synergie de dégradation entre le choc thermique et la RAS ou l'ESA?

- Comment ces combinaisons d'endommagements modifient-elles les paramètres de caractérisation d'acoustique non linéaire?

L'objectif global de ce mémoire est donc d'évaluer les performances des techniques acoustiques (NIRAS et NRUS) pour caractériser et quantifier l'endommagement combiné du béton par RAS, ESA et choc thermique. Cet objectif est novateur car il permet une meilleure compréhension et donc une meilleure application des méthodes NRUS et NIRAS dans le cas de la caractérisation d'endommagement combiné dans le béton. En effet, une meilleure compréhension des performances de ces deux méthodes dans le cas d'endommagement combiné permettrait d'étendre leur utilisation à davantage de cas d'études du béton impliquant des combinaisons d'endommagements.

Le mémoire est structuré de la manière suivante. Une revue de littérature est présentée au chapitre 2 afin d'exposer les points importants de la RAS, de l'ESA et de l'endommagement par choc thermique dans le béton, ainsi que du contrôle non destructif par méthode acoustique. Ensuite, la méthodologie explique les matériaux et procédures de création et d'endommagement des éprouvettes de béton (chapitre 3). Les dernières parties exposent les résultats obtenus (chapitre 4), leur analyse et leur interprétation (chapitre 5) en vue d'établir des conclusions sur l'étude.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 RÉACTION ALCALIS-GRANULAT

La Réaction Alcalis-Granulat (RAG) est un type d'endommagement du béton lié à certains de ses composants. Les composants en question sont certaines phases siliceuses des granulats et les ions alcalins (Na^+ et K^+) et hydroxyles (OH^-) de la solution interstitielle du béton. Le produit de cette réaction est un gel de silice expansif qui occupe dans un premier temps les pores de la structure. Lorsque l'espace est insuffisant pour son développement, les contraintes internes du béton augmentent ; c'est ainsi que la microfissuration se met en place (figure 2.1).



Figure 2.1 - Fissuration de surface <http://www.qtechndtins.com/>

Il existe trois types de RAG : réaction alcali-silice (RAS), réaction alcali-carbonate (RAC) et la réaction d'alcali-silicate (Lahdensivu et Aromaa, 2015). Certains auteurs ne mentionnent pas cette dernière et la décrivent comme une forme de RAS [12]. Comme mentionné précédemment, la RAS met en jeu les ions alcalins Na^+ et K^+ et certaines phases de silice réactive des granulats présents dans le béton. Ces formes sont l'opale, la calcédoine, chaille et certaines formes de quartz (instable dans un environnement alcalin avec un pH élevé) [13]. Le développement de la

RAS se fait en deux étapes : une première qui est la formation du gel suite aux réactions qui ont lieu. La deuxième étant l'expansion du gel en présence d'eau.

Dans ce projet de recherche, nous nous intéresserons uniquement à la RAS, car elle est la plus répandue dans le monde et notamment au Canada. La littérature fait parfois référence au terme alcali-réaction pour mentionner la RAG. Nous verrons ensuite les paramètres nécessaires au développement de la RAS :

- Teneur en alcalis

Les alcalis peuvent venir des différentes sources composant le béton.

- Interne

Ils peuvent venir de matériaux propres au béton : le ciment, les ajouts cimentaires et les granulats. Pour les granulats, les réactifs et non réactifs fournissent des alcalis. La quantité disponible pour la RAS varie selon le type de granulats [14].

- Externe

Les alcalis peuvent venir de l'environnement dans lequel évolue le béton. Les sources principales externes sont l'eau de mer et les sels de déglacage pour les structures routières.

- Granulats

La composition des granulats joue un rôle essentiel dans le développement de la RAS. Elle contribue à l'apport d'alcalis, mais aussi en silice. La quantité de ce dernier permet de savoir si le granulat est réactif ou pas. La taille des granulats influence l'allongement de la RAS. Cependant, la littérature est mitigée sur ce sujet. La théorie montrerait que plus les granulats sont fins, plus la surface réactive est grande donc la production de gel est plus importante. Les dommages augmenteraient donc. Les chercheurs semblent se rejoindre sur le fait qu'il y aurait un effet « pessimum », c'est-à-dire une fourchette de dimension des granulats pour lesquels l'allongement du gel serait maximal [14].

- Humidité

L'humidité relative du béton et l'humidité ambiante sont primordiales pour la réaction. En effet, sans eau la réaction ne peut pas avoir lieu, cependant, si l'élément en béton est totalement immergé dans de l'eau alors, les alcalis peuvent être lessivés et donc la réaction peut être ralentie. Cela dépend des dimensions de l'ouvrage en béton. En effet, si l'élément en béton est fin, alors les alcalis seront lessivés, quelle que soit l'humidité relative de l'élément (sec ou saturé). D'un autre côté, si on s'intéresse à un béton de masse, l'humidité relative externe de l'élément n'aura pas ou très peu d'influence sur le développement de RAG, car l'humidité interne du béton sera assez importante [15].

- Température

La littérature montre que la température joue un rôle clé dans le développement de celle-ci. En effet, le mécanisme de la RAS est thermoactivé. Ce qui veut dire que plus la température est importante, plus le développement de la RAS est rapide [16]. La formation de gel est accélérée [17]. La particularité est que certaines études sont faites à l'échelle mésoscopique, faisant varier énormément les températures (variation de 65°C à -20°C), mais ne mentionne aucune formulation de béton [18]. De plus, des programmes expérimentaux de certains chercheurs séparent bien l'endommagement en laboratoire de la RAS et thermique (cycle gel/dégel) [19].

Cependant, il est nécessaire de faire attention aux différents résultats de ce sujet, car certains chercheurs s'intéressent à l'évolution de la température en fonction du développement de RAS (formation du gel de silice et de son expansion) dans le béton. Cela n'est pas le sujet de recherche.

Les cas d'études trouvées font mention de plusieurs endommagements sur les structures. Cependant les auteurs analysent les causes de dégradations indépendamment les unes des autres [20].

2.2 LES ATTAQUES SULFATIQUES

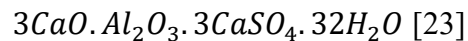
Les attaques sulfatiques sont une dégradation courante des ouvrages en béton. Ce chapitre présente les différentes attaques sulfatiques qu'il existe ainsi que leurs mécanismes. La catégorisation des attaques varie selon les chercheurs. Il est important de mentionner que les nominations des différentes attaques varient selon les chercheurs. L'article de M. Collepardi [21] fait référence à ces différences, elles sont plus récemment rappelées par J. A. Hartell [22].

Les attaques sulfatiques se manifestent principalement par deux mécanismes: la formation d'ettringite et la formation de gypse [22].

2.2.1 Mécanismes de réaction

- Formation d'ettringite

L'ettringite qui se forme dans le béton a la composition suivante :

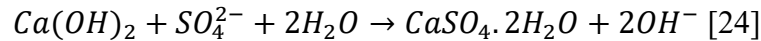


La formation d'ettringite dans le béton peut se faire de plusieurs façons tout au long de la prise du béton.

Selon le moment de cette formation d'ettringite, elle peut être dommageable pour le matériau ou non. Lorsque la formation d'ettringite se fait à l'état frais, celle-ci n'est pas dommageable en raison de la viscosité du matériau. Cependant, à l'état solide, les forces exercées par cette formation sur le béton sont parfois supérieures aux capacités du matériau. Cela entraîne un endommagement de celui-ci. L'endommagement que peut provoquer la formation d'ettringite est son allongement. C'est à dire tout d'abord une microfissuration du matériau jusqu'à une macrofissuration. Cela engendre donc une perte des performances mécaniques du matériau.

- Formation de gypse

La formation du gypse dans le béton suit la réaction suivante :



La formation du gypse dans le béton dû à l'exposition aux sulfates du matériau est présente avec d'autres mécanismes de réaction qui sont la formation d'ettringite et de thaumasite. Le gonflement du béton lié à la formation du gypse proviendrait des pressions de cristallisations et des pressions hydrauliques au sein de la matrice cimentaire.

Compte tenu du des autres réactions chimiques qui ont lieu en même temps, il est complexe de déterminer l'origine des gonflements. De même pour la caractérisation et la quantification des dégradations mécaniques du matériau, il est complexe de savoir quelle réaction est à l'origine de ces dernières. Afin d'étudier ces mécanismes, les chercheurs privilégient l'analyse comparative d'éprouvettes de mortier contenant du ciment Portland et d'autres contenant uniquement du C_3S afin d'isoler la formation du gypse dans un seul type d'éprouvette [24].

2.2.2 Réaction Sulfatique Interne

- Primaire

Comme mentionné précédemment, par « primaire » nous nous référons à la période où le béton est toujours à l'état frais. Le mécanisme qui est lié à cette attaque sulfatique est la formation d'ettringite.

La réaction chimique a lieu entre (le gypse qui permet de retarder la prise du béton) et une des phases minérales du ciment : l'aluminate tricalcique ($3CaO \cdot Al_2O_3 - C_3A$ en notation cimentière) lors de l'hydratation du ciment. Le produit de cette réaction est un sulfoaluminate dont la forme la plus connue est l'ettringite.

Les particules d'ettringite se forment autour des C_3A et les protègent de l'hydratation jusqu'à ce que la quantité de gypse (sulfate de calcium) diminue. Les cristaux d'ettringite se connectent les uns aux autres. Ces connexions permettent d'améliorer l'ouvrabilité du béton [23]. Lorsqu'il y a diminution de la quantité de gypse, il y a instabilité de l'ettringite et elle se transforme en monosulfoaluminate de calcium hydraté.

La formation d'ettringite à ce stade de l'hydratation du ciment n'est pas forcément problématique pour le béton. En effet, elle peut être positive. L'expansion liée à cette réaction chimique peut être bénéfique, car elle a lieu en début de prise du béton, c'est-à-dire lorsque le retrait de séchage débute. Ainsi, les contraintes engendrées par la formation de l'ettringite compensent en partie celle du retrait [21].

- Formation d'Ettringite Différée

L'origine de la formation d'Ettringite différée est due à une élévation de température.

Il a été démontré qu'une élévation de la température lors du début de l'hydratation modifiait les réactions d'hydratations des éléments. Les raisons d'élévations de température sont dues à l'hydratation du béton, car la réaction est exothermique et/ou artificiellement lors de la fabrication de celui-ci pour accélérer le durcissement et l'obtention de performances mécaniques élevées à jeune âge [23].

Avec cette élévation de température, la formation d'ettringite primaire que nous avons mentionnée précédemment est réduite par le fait que sa solubilité augmente avec une élévation de la température. L'ettringite déjà formée se décompose et la formation de nouvelle est empêchée [23]. Il y a donc une augmentation de la concentration en sulfates dans la solution interstitielle du béton [25].

Lorsqu'il y a atteinte de températures entre 70 et 90 °C les sulfates dissous se fixent aux C-S-H (silicates de calcium hydratés) sous forme de SO_4^{2-} par adsorption. De plus, cette capacité d'adsorption augmente en fonction du rapport CaO/SiO_2 des C-S-H. Ce rapport augmente avec

une élévation de la température [25]. Le pH de la solution interstitielle du béton joue de même rôle important dans l'adsorption des sulfates par les C-S-H [26]. De plus, ces liaisons sulfates – C-S-H sont peu stables et donc les C-S-H peuvent les libérer [25].

- Facteurs de développement de la DEF

La figure 2.2 illustre les différents facteurs nécessaires au développement de la formation d'ettringite différée.

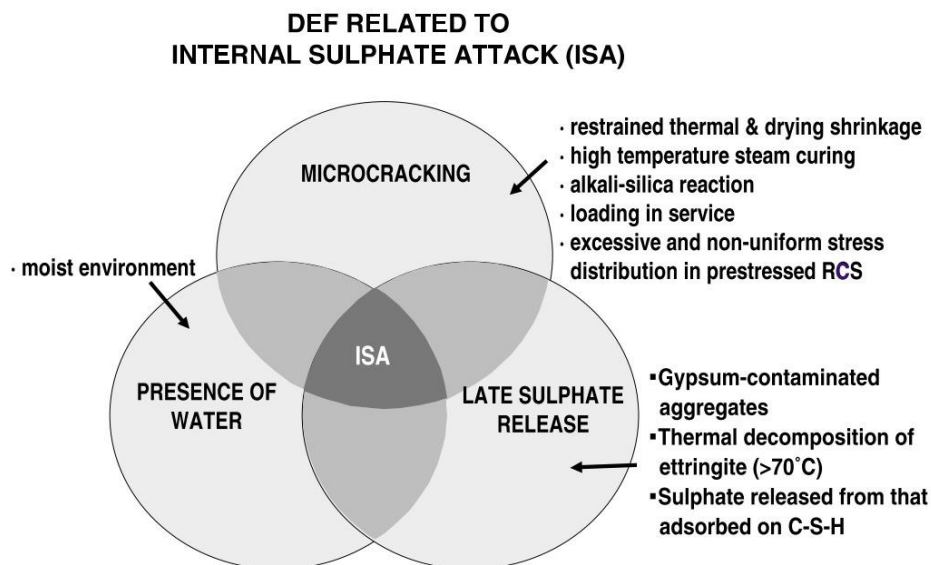


Figure 2.2 - Facteurs nécessaires au développement de la Formation d'Ettringite Différée [21]

- Température

Comme mentionné précédemment, la température est un facteur important dans la formation d'ettringite différée. Les élévations de température dans le béton proviennent de la chaleur d'hydratation (réaction exothermique). Des raisons de fabrication existent aussi. Lors de la préfabrication d'éléments structuraux en béton, les industriels chauffent le matériau afin d'accélérer la réaction pour gagner en productivité [27].

- Humidité [21], [27]

L'humidité a deux fonctions dans le processus de formations d'ettringite. Elle permet tout d'abord de transporter les ions nécessaires à sa formation. Les ions en question sont : SO_4^{2-} , $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ et Ca^{2+} . Ces ions migrent vers les microfissures où la formation peut avoir lieu. De plus, elle prend part dans la composition chimique de celle-ci. Nous constatons cela par les 32 molécules d'eau entrant dans sa composition.

De plus, de nombreux travaux montrent qu'il est nécessaire d'avoir une humidité relative de 80 à 90 % pour que la réaction puisse se développer et d'au moins 90% pour qu'une expansion soit observée [28].

- Les matériaux

La figure 2.2 rappelle que les sulfates peuvent provenir du ciment du béton. Ils peuvent être libérés par les C-S-H. Des études ont montré qu'en réduisant la teneur des sulfates (SO_3) présente dans le ciment il y a réduction de l'allongement. C'est ce que montre une étude de Pavoine et al. [29].

La teneur en alcalis du ciment joue un rôle dans le développement de la DEF. Les recherches de Kelham [30] montrent que l'ajout d'alcalis sous forme de KOH dissous dans l'eau de gâchage accélère l'expansion des échantillons.

Plus globalement, les granulats jouent un rôle dans le développement de la DEF. Les paramètres rentrant en considération sont la nature des granulats, leurs tailles et leurs propriétés intrinsèques comme le coefficient de dilatation. Les ajouts cimentaires ajoutés à la formulation d'un béton ont aussi une influence sur le développement de la DEF. Ils permettent, dans le cas des cendres volantes, des métakaolins et des laitiers de hauts fourneaux de limiter l'allongement de la DEF. Leurs influences varient en fonction de leurs compositions et de leurs dosages [28].

- Fumée de Silice

Dans le cas de l'ajout de fumée de silice, le lessivage des alcalis est ralenti ce qui réduit l'expansion associée à la DEF. En effet, la finesse de la fumée de silice va diminuer la porosité

du béton et réduire sa perméabilité. Le lessivage des alcalis sera donc ralenti ce qui induit une baisse du pH plus lente dans la solution interstitielle du béton. Les sulfates initialement adsorbés par les C-S-H mettront plus de temps à se détacher et réagir en solution. Ainsi, la fumée de silice ralentit le processus de formation de l'ettringite [31].

- Métakaolins, cendres volantes et laitiers

Des chercheurs ont montré que le rapport $\text{SO}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ est important dans le développement de la DEF dans le béton. Il y aurait un intervalle de valeurs pessimum. En effet, l'ajout de Al_2O_3 par certains ajouts cimentaires comme les métakaolins feraient varier la valeur du rapport et donc ferait sortir ce rapport des valeurs critiques. Il en est de même pour les ajouts cimentaires comme les laitiers et les cendres volantes qui contiennent du Al_2O_3 .

- Porosité [27], [28]

Les différents vides qui sont présents dans le béton sont les pores, les bulles d'air et les fissures. Il existe donc différentes causes à ces formations.

Le rapport E/C en est une. En effet, il est connu qu'un rapport E/C important laissera une quantité importante d'eau non utilisée pour l'hydratation du ciment et créera de la porosité lors de son évaporation. Les échanges ioniques seront donc possibles grâce à l'air et l'eau qui pourrait s'infiltrer dans le matériau et la formation d'ettringite se fera.

De plus, un rapport faible signifie la présence d'une quantité importante de ciment. Il y a donc un dégagement de chaleur plus important dans ce cas. Cela est favorable au développement de la DEF, car la solubilité de l'ettringite augmente.

Un faible rapport E/C diminue la porosité du béton donc augmente les contraintes lorsqu'il y a formation d'ettringite différée. Des résultats obtenus par Petrov le confirment [32]. Nous pouvons donc dire qu'un rapport E/C élevé facilite la formation de la DEF, car les échanges ioniques sont facilement réalisables grâce à la grande porosité, mais les pressions seront faibles

en raison de l'espace disponible plus important. Inversement, un rapport faible permettra difficilement la formation de DEF dû à la faible porosité, les pressions seront importantes.

2.2.3 Attaque Sulfatique Externe

Une attaque sulfatique externe a lieu lorsque des sulfates sont en quantité suffisante dans l'environnement du béton pour réagir avec celui-ci et affecter ses propriétés. Les sulfates doivent être en solution pour pouvoir réagir avec la pâte de ciment hydratée. Les sels solides n'attaquent pas le béton [33]. Plusieurs mécanismes de réaction peuvent avoir lieu dans le cas de l'ESA. Ceux sont des réactions physico-chimiques. Ils varient en fonction des éléments chimiques mis en jeu. Ces mécanismes sont la formation de gypse, la formation d'ettringite - qui ont été développés ci-dessus - ou de la thaumasite et la transformation des produits d'hydratation [22], [33]. La dégradation du béton lié à cette attaque est créée par la combinaison de trois paramètres, résumé par Collepardi : la perméabilité du béton, l'humidité de milieu ambiant et la présence de sulfates dans l'environnement ambiant de la structure [21].

L'attaque sulfatique externe sur le béton peut être influencée par différents phénomènes :

- Cycles de mouillage séchage

Les cycles de mouillage/séchage simulent des zones des structures étant exposées à de fortes variations d'humidité, dû à des éclaboussements par exemple. C'est le cas des zones de marnage dans les ports qui sont constamment exposées aux marées [34] [35]. Les cycles de mouillage séchage de la solution sulfatique accélèrent le processus de dégradation du matériau. La raison est que lors du séchage il y a cristallisation des sels et cette formation génère des contraintes dans les pores. Ces contraintes peuvent donc endommager le matériau par leur importance : pression de cristallisation [33].

- pH de la solution sulfatique

Lors de l'exposition aux sulfates du béton au laboratoire, il peut y avoir lessivage des alcalis du béton et entraîner une variation du pH de la solution sulfatique. Une augmentation du pH (vers une valeur de 12) associé à ce lessivage des alcalis stabilise la pâte de ciment et favorise la formation d'ettringite [22]. Ces variations en laboratoire ne sont pas réalistes par rapport aux structures existantes. Les variations de pH sur le terrain ont tendance à être plus constantes, car il y a un renouvellement possible des sulfates [22] [36].

La façon dont est contrôlé le pH en laboratoire est en renouvelant la solution sulfatique. Les fréquences de renouvellement de la solution varient selon les recherches des chercheurs. L'ASTM C1012 ne préconise pas une fréquence de renouvellement. Elle indique seulement qu'il est nécessaire d'avoir une solution à un pH entre six et huit en début de l'essai.

Concernant la caractérisation des endommagements liés aux attaques sulfatiques externes, certains chercheurs ont critiqué des méthodes utilisées pour différentes raisons. La revue de littérature de Hartell [22] résume les différents aspects de ce sujet comme la concentration des solutions pour les essais en laboratoire, les conditions d'expositions des éprouvettes (immersion totale ou partielle des éprouvettes) ou bien la géométrie de ces dernières.

2.3 COMBINAISON D'ENDOMMAGEMENTS

Les structures en béton du génie civil subissent plusieurs sollicitations en même temps. Cela peut être le chargement lié à l'utilisation de la structure, les conditions climatiques (variation de température, variation d'humidité, etc.) ou bien à l'exposition à des produits chimiques.

Dans le cas, le travail des chercheurs est de simuler ces combinaisons afin d'étudier la dégradation du matériau pour avoir des résultats les plus pertinents possible. Ces combinaisons d'endommagements sont nombreuses, cette partie a pour but de faire un bilan le travail des chercheurs sur les combinaisons des endommagements liées à notre projet.

- RAS

Le lien entre dans la RAS et d'autres attaques est relativement présentes dans la littérature. La combinaison d'endommagement de la RAS est toujours présente avec des contraintes mécaniques dans le béton. En effet, une structure affectée par la RAS subit aussi rechargement lié `son exploitation. Il y a un intérêt pour l'étude du développement du gel de la RAS sous ses chargements. La revue de littérature de Morenon [37] explique l'influence de chargements uniaxiaux et multiaxiaux sur le gonflement dû à la RAS et sur les déformations axiales et radiales : « *Il serait donc possible d'appliquer une contrainte qui pourrait stopper le gonflement dans une direction, et il existe un report du gonflement plus ou moins important dans les autres directions.* »

En effet, la RAS et la DEF partagent des paramètres « activateurs » comme l'humidité et la nécessité d'une microfissuration pour pouvoir se développer. L'étude de ces paramètres dans le béton permet d'arriver à des conclusions comme celle que la formation d'ettringite différée se formerait avant celle de la RAS [38]. Des études de cas récents sur des structures hydrauliques existent comme celle des travaux de [39] où les chercheurs démontrent que l'endommagement de la structure est lié au développement d'une attaque sulfatique interne, mais aussi de la RAS non diagnostiquée précédemment. Ces endommagements se développent à des cinétiques, localisations et moment différents. Globalement, selon les cas d'études les chercheurs arrivent à plusieurs conclusions : la RAS étant un prérequis pour le développement ensuite de la formation d'ettringite. Cependant, le sujet de la chronologie des événements, c'est-à-dire, est-ce la RAS ou la DEF qui a lieu en premier est sujet de discussion. En effet, cela est résumé par [40].

- ESA

L'étude de l'attaque sulfatique externe est présente sur des structures pouvant être exposées à d'autres facteurs pouvant aggraver cette attaque. C'est le cas des cycles de mouillage / séchage qui peuvent être présent dans les zones de marnages comme nous l'avons mentionné précédemment.

Dans le cas des attaques sulfatiques externes, les combinaisons d'endommagements possibles sont associées aux réactions chimiques liées à l'exposition du matériau aux sulfates et à ses conséquences mécaniques. Les autres combinaisons sont liées aux conditions d'expositions climatiques d'une structure et de son chargement.

Dans le premier cas, l'exposition aux sulfates modifie la matrice cimentaire du matériau. Cela est prouvé par le lessivage des ions hydroxydes (OH^-) qui augmente le pH de la solution environnante. Dans ce cas, les ions alcalins de la solution sulfatique (dans le cas du sulfate de sodium) peuvent migrer vers la solution interstitielle du béton. Cela augmente les risques du développement de la RAG [36].

Des chercheurs s'intéressent à la création du modèle mathématique pour prévoir le comportement lié à des combinaisons d'endommagements où une attaque sulfatique externe est en jeu. C'est le cas de [41] qui propose un modèle prévoyant le comportement de poutres en béton armé sous attaque sulfatique externe et chargement en quatre points. La justification de ces travaux est le manque de précision des modèles qui ne prennent pas en compte un chargement lorsqu'ils sont appliqués en pratique.

2.4 CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

Il existe différentes techniques non destructives afin de diagnostiquer et suivre les réactions de l'allongement internes dans le béton. Les techniques les plus couramment utilisées sont :

2.4.1 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Cet essai mesure la vitesse des ondes de compression à travers un échantillon de béton [42]. Il est normalisé selon l'ASTM C597. En fonction des résultats de la vitesse, il est possible de dire que le béton est résistant ou pas. Pour des vitesses supérieures à 4575 m/s le matériau est considéré comme excellent, pour des vitesses inférieures à 2135 m/s le matériau est considéré comme étant de mauvaise qualité.



Figure 2.3 - Contrôle Non Destructif (mesure des vitesses ultrasonores en transmission directe) <http://www.european-coatings.com/>

Certains chercheurs ont utilisé cette méthode aussi bien en laboratoire que sur des structures endommagées. Boukari et al. [43] s'intéressent à des échantillons endommagés par RAS. Ils observent que lorsque l'allongement augmente (passage de 0 à 0,06%) il y a une très faible diminution de la vitesse de propagation des ondes de compression (passage de 4570 m/s à 4477 m/s). Cependant, lorsque l'allongement passe de 0,06% à 0,09%, il y a augmentation de la vitesse de propagation des ondes (de 4477 m/s à 4602 m/s). L'explication donnée est que le gel de silice associé au développement de la RAS est plus important et occupe les fissures déjà formées. Ce gel est essentiellement composé d'eau et l'ASTM [44] explique que la vitesse de propagation des ondes dans un élément saturé est plus importante. Cela est donc cohérent. Les travaux de Kodjo [6] le confirment.

La technique de mesure de vitesse de propagation des ondes peut être limitée compte tenu du fait que le béton est un matériau hétérogène. En effet, la porosité peut varier ainsi la répartition de la fissuration dans l'élément. Les résultats peuvent donc fluctuer pour des échantillons avec le même état de dégradation.

Face à ce constat, plusieurs possibilités existent afin d'augmenter la pertinence des mesures. Des chercheurs [45] se sont intéressés au calcul de coefficients à partir des valeurs de vitesse de propagation obtenues sur la structure analysée, des valeurs obtenues en laboratoire sur le même

matériau et de valeurs provenant d'éléments fortement endommagés. Le coefficient en question s'appelle : *Concrete Quality Designation*.

Cette méthode de calcul des résultats avec la mesure de la vitesse de propagation des ondes acoustiques permet d'avoir une meilleure précision de l'endommagement du matériau, et ce sur un ouvrage. La mesure des vitesses de propagation a été étudiée sur d'autres types d'endommagements, par exemple les cycles de gel/dégel sur des échantillons de mortier [46] ou de béton [47]. Pour le premier [46], en considérant des éprouvettes exposées à un traitement thermique (augmentation de température) entraînant le développement de la DEF, les cycles de gel/dégel ont une influence sur les valeurs d'UPV. Plus la durée entre le traitement thermique créant la DEF et le gâchage est espacée, plus les cycles de gel/dégel font diminuer les vitesses UPV. Dans le cas du second [47], les mesures d'UPV permettent de suivre l'endommagement par cycles de gel/dégel de béton avec et sans air entrainé.

2.4.2 Damage Rating Index (DRI)

Le Damage Rating Index est une méthode pétrographique permettant de quantifier l'endommagement du béton en identifiant des caractéristiques de détérioration propres à la RAS [48]. Cette méthode a été développée par Grattan-Bellew et Mitchell [49] avec comme source les travaux de Sims en 1992 [50].

Le principe de la méthode consiste à observer une surface polie de béton au stéréomicroscope à un grossissement de 16x. Celle-ci est divisée en carré d'une surface de 1 cm². Les défauts sont classés en indices pétrographiques. Chacun de ces indices a un coefficient de pondération en fonction de leur importance dans l'endommagement du béton face à la RAS (Tableau 2.1). Une fois comptabilisée, la somme est normalisée pour une surface de 100 cm².

Une critique de cette méthode est la variabilité des résultats en fonction des opérateurs. De nouveaux coefficients des indices pétrographiques ont été proposés en 2011 par Véronique Villeneuve suite à une étude permettant la réévaluation de « *la validité du DRI comme outil d'évaluation de l'état d'endommagement du béton.* » [51].

Les coefficients de cette étude sont les suivants :

Tableau 2.1 - Indices pétrographiques et facteurs de la méthode de Villeneuve [51]

Indices pétrographiques		Facteurs de pondération
Fissures dans les particules de granulats	Fermées (sans produit de réaction)	0,25
	Ouvertes ou en fin réseau (sans produit de réaction)	2
	Ouvertes ou en fin réseau (avec produit de réaction)	2
Fissures dans la pâte de ciment	Sans produit de réaction	3
	Avec produit de réaction	3
Granulats déchaussés		3
Granulats désagrégés		2

L'utilisation de cette méthode pour d'autres types d'endommagements dus à des réactions de gonflement interne est étudiée par les chercheurs. C'est le cas des travaux de Sanchez en 2018 [52] dans le cas de RAS, DEF et de cycles de gel/dégel. La première conclusion étant que le DRI et le SDT (Stiffness Damage Test) sont fiables et complémentaires lors de l'évaluation du béton endommagé par RAS, DEF et de cycles de gel/dégel.

Cette méthode sera appliquée afin de valider la performance des mesures non destructives en fonction du degré d'endommagement réel des échantillons.

2.4.3 Acoustique Non Linéaire.

La technique consiste à sonder le matériau par une onde haute fréquence de faible amplitude pendant qu'une onde basse fréquence de forte amplitude perturbe le milieu, modifiant de façon locale et temporelle les propriétés élastiques du matériau [53].

La modification des propriétés « *induit localement des modifications mesurables du milieu de propagation ; modifications entraînant l'apparition de phénomènes inconnus en acoustique linéaire tels que la génération d'harmoniques* » [54].

Il est important de mentionner que toutes les méthodes de Contrôles Non Destructifs ne s'appliquent pas pour les mêmes endommagements [55]. En effet, elles s'appliquent en fonction des endommagements et de leur niveau de dégradation. Lorsque l'endommagement du béton entraîne une microfissuration et une décohésion des interfaces, la non-linéarité du béton augmente. Les méthodes d'acoustique non linéaire mesurent cette non-linéarité.

Les raisons de développement de l'acoustique non linéaire sont que les paramètres mesurés comme le module d'Élasticité dynamique sont fortement influencés par l'hétérogénéité du matériau, par ses propriétés physiques. Ainsi, la caractérisation par cette méthode ne permet pas d'avoir de façon précise celle d'une dégradation.

Les méthodes non linéaires se développent notamment pour répondre à cette problématique. Les méthodes acoustiques permettent de s'intéresser aux propriétés élastiques du matériau. D'après la loi de Hooke (équation 1), nous avons

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

avec E le module d'Young

Ainsi, si le coefficient E est indépendant du niveau de sollicitation σ , il s'agit du domaine élastique linéaire. L'acoustique linéaire propage des ondes mécaniques de faible amplitude dont les déformations induites ne modifient pas les propriétés élastiques du matériau [6]. Dans le cas où le coefficient E est fonction de la contrainte appliquée σ , il n'y a plus proportionnalité entre la contrainte et la déformation, il s'agit donc du domaine élastique non linéaire [54]. Cela signifie que le module d'Young n'est plus une constante, mais varie en fonction de l'état de déformation du matériau. La loi de Hooke devient donc:

$$\sigma = E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \cdot \varepsilon \quad (2) \quad [56]$$

Avec $E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = E_0(1 - \beta\varepsilon - \delta\varepsilon^2 - \alpha[\Delta\varepsilon + \varepsilon(t)\text{sign}(\dot{\varepsilon}) + \dots])$

- E_0 : partie linéaire du module d'élasticité
- β et δ coefficients de non-linéarité
- **α : expression de la composante non linéaire hystérétique**

- $\Delta\varepsilon$: amplitude de déformation
- $\text{sign} = +1$ si $\dot{\varepsilon}$ (vitesse de déformation) > 0
- $\text{sign} = -1$ si $\dot{\varepsilon} < 0$

Ce comportement est causé par les défauts et irrégularités du matériau à l'échelle atomique. Ainsi l'endommagement (microfissuration) augmente le comportement non linéaire du matériau. En acoustique non linéaire, les déformations qui modifient les propriétés élastiques des matériaux sont induites par la propagation d'ondes acoustiques de fortes amplitudes. La modification de ces propriétés a donc une influence sur la propagation des ondes.

La méthode d'acoustique non linéaire possède plusieurs formes d'études qui varient en fonction des amplitudes et fréquences émises dans les échantillons.

▪ 2.4.3.1 Dynamique rapide

Cette méthode consiste à analyser la réponse d'un échantillon en émettant une onde sinusoïdale d'amplitudes variable.

La sollicitation émise d'amplitude variable engendre une réponse variant en fonction des propriétés du matériau. Il peut y avoir une diminution de la fréquence de résonance, génération d'harmoniques et l'atténuation augmente. Ces comportements sont plus sensibles que les paramètres linéaires pour la détection de la microfissuration dans le béton [56].

Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'influence l'endommagement du béton sur le décalage fréquentiel en dynamique rapide [57], montrant ainsi le lien entre l'endommagement et le comportement hystérétique du matériau, soit le décalage fréquentiel.

▪ 2.4.3.2 Dynamique lente

La dynamique lente a pour but d'émettre des ondes de fortes amplitudes dans l'échantillon analysé. Ces ondes modifient les propriétés élastiques du matériau en induisant un comportement non linéaire [58].

L'étude de la dynamique lente se divise en deux parties : la première partie concerne le conditionnement de l'échantillon, la deuxième partie concerne la relaxation de l'échantillon. Pendant la phase de conditionnement, une excitation sinusoïdale de forte amplitude excite l'échantillon ce qui diminue les propriétés élastiques du matériau. De même, lors de la phase de relaxation, le matériau retrouve ces propriétés initiales [56].

Lors des essais de dynamique lente, un phénomène hystérétique est observé. C'est-à-dire qu'il y a retour lent à l'équilibre après perturbation [6]. Il existe donc un paramètre temporel lié à cette relaxation qui est la constante de temps de relaxation τ et λ constante d'hystérésis.

Ces paramètres peuvent être retrouvés dans :

$$\Delta M = G'_1 + G'_2 \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^\gamma} \quad (3)$$

Où

- ΔM : Variation du module élastique
- G'_1 et G'_2 dépendent des valeurs initiales et finales de l'amplitude du module
- τ : temps de réponse moyen du conditionnement
- γ : coefficient d'ajustement de la courbe de conditionnement

Ainsi, les chercheurs se concentrent sur cette variation du module d'élasticité par cette méthode pour caractériser des endommagements dans le béton. C'est notamment le cas de l'étude de Kodjo et al. avec la RAS [58] et des chocs thermiques [59].

Ils existent plusieurs méthodes permettant de créer cette dynamique lente dans le béton. L'une d'entre elles est appelée *Nonlinear Resonance Ultrasonic Spectroscopy* (NRUS) et une autre est appelée *Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy* (NIRAS). Ce sont ces deux

méthodes que nous utilisons dans ce projet de recherche. Les deux méthodes se distinguent par l'émission des ondes dans le matériau en vue de perturber le matériau et faire apparaître sa nonlinéarité. Dans le cas de la méthode NIRAS, cela se fait par un choc avec une bille d'acier ou un marteau. Cette méthode va générer des ondes de différentes amplitudes et de différentes fréquences au moment de l'émission du choc. Elles permettent ensuite de mesurer la nonlinéarité du matériau. À l'inverse, l'émission des chocs dans la méthode NRUS se fait à amplitude et fréquence définies. Dans le cas de ce projet, le balayage d'amplitude a lieu entre 100 mV et 800 mV avec un pas de 50 mV. Le balayage fréquentiel se fait autour de la fréquence de résonance du matériau.

- NRUS

La méthode NRUS est utilisée avec un capteur piézoélectrique comme émetteur et un accéléromètre comme receveur placé de part et d'autre de l'échantillon étudié. Cette méthode est connue parmi les chercheurs dans la caractérisation des endommagements du béton. Cependant, elle n'est pas de nos jours applicable à des problématiques industrielles pour des raisons d'imprécisions face à des endommagements complexes et, car l'interprétation des données dépend fortement de l'acousticien chargé de cette mission.

Cette méthode fait l'objet d'étude pour plusieurs types d'endommagement comme la RAG, les attaques sulfatiques et des endommagements liés aux conditions d'expositions comme les cycles de gel/dégel [60][8][61].

- NIRAS

Dans le cas de l'application de cette méthode à un endommagement par attaque sulfatique, des chercheurs ont testé son efficacité. Genovés et al. [62] ont comparé la méthode NIRAS à la mesure d'allongement des éprouvettes selon l'ASTM C1012. Les paramètres acoustiques mesurés sont le décalage fréquentiel, α et le facteur de qualité du signal. L'étude est réalisée sur

des éprouvettes endommagées par des attaques sulfatiques externes et internes. Elle est complétée par des mesures de thermogravimétrie, de diffraction aux rayons X et des observations au microscope électronique à balayage. Les résultats de l'étude montrent que la méthode NIRAS permet de détecter l'endommagement par attaque sulfatique externe et interne lorsque l'endommagement est « faible à modéré ». De même, il y a une « bonne corrélation » entre l'essai NIRAS et l'allongement ainsi que l'analyse microstructurale du matériau. Des travaux ont aussi été réalisés par les mêmes auteurs dans le cas d'attaque sulfatique interne [63].

Cette méthode est aussi utilisée pour la caractérisation d'autres endommagements en laboratoire comme les cycles de gel/dégel [64] [60].

3 MÉTHODOLOGIE

Afin de répondre à l'objectif général qui est l'évaluation de la performance des méthodes NRUS et NIRAS dans le cas d'endommagement combiné dans le béton, le programme expérimental est basé sur une analyse comparative de plusieurs dégradations et combinaison de dégradations affectant le béton. Les dégradations et combinaisons de dégradations qui ont été créées sont les suivantes:

- Réaction Alcalis-Silice ;
- Réaction Alcalis-Silice avec un choc thermique ;
- Attaque Sulfatique Externe ;
- Attaque Sulfatique Externe avec un choc thermique ;
- Échantillons de référence;
- Échantillons de référence avec un choc thermique ;

Plusieurs paramètres sont pris en compte pour établir ces comparaisons. Ils sont mesurés grâce à différentes méthodes de caractérisations.

Le programme expérimental a été divisé en trois étapes : une première qui permet la production des échantillons avec leurs endommagements respectifs mentionnés ci-dessus. Une deuxième qui permet la caractérisation des endommagements de façon destructive et non destructive. Voici les paramètres mesurés:

- Masse et allongement
- Résistance à la compression et à la traction indirecte
- Module d'Young
- Vitesse de propagation des ondes de compression
- Coefficient de non linéarité α
- Fréquence de résonance des échantillons
- DRI

Finalement, une étude comparative des paramètres mesurés sera faite. En effet, avec les paramètres mesurés, il est possible de les comparer les résultats obtenus avec ceux des méthodes NRUS et NIRAS (coefficient de non linéarité α et variations de fréquence de résonnance) avec les autres. Cela permet d'évaluer les mesures des méthodes acoustiques non linéaire comparativement avec les autres.

3.1 PRODUCTION DES BÉTONS ET DES ENDOMMAGEMENTS

Trois types de bétons ont été produits dans ce projet de recherche et sont fonction des endommagements créés pour mener à bien ce projet de recherche :

- Béton sain servant de référence ;
- Béton développant la réaction Alcalis-Silice (RAS) ;
- Béton exposé à une solution sulfatique ;

Pour chacun de ces bétons, la moitié de la quantité produite est utilisée pour appliquer un choc thermique et étudier son influence. L'acquisition et la comparaison des données mentionnées précédemment permettent d'étudier l'influence du choc thermique sur des échantillons de référence et sur les échantillons endommagés (RAS et attaque sulfatique externe).

La production des bétons selon les modes d'endommagement ciblés est résumée au schéma de la figure 3.1 :

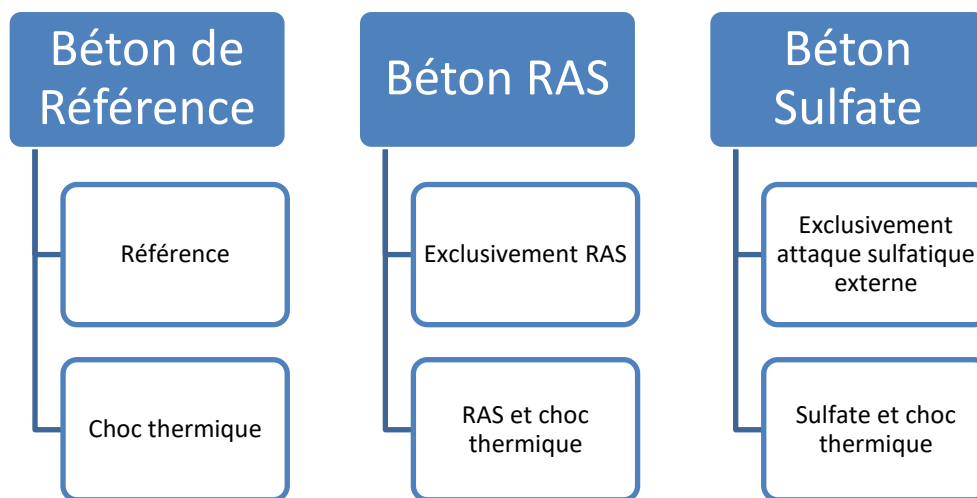


Figure 3.1 - Identification des bétons selon les modes d'endommagement ciblés

3.2 MATÉRIAUX DES MÉLANGES

Pour toutes les formulations, aucun ajout cimentaire ni adjuvant n'est ajouté. De même, aucun entraîneur d'air n'est utilisé.

3.2.1 Ciment

Le type de ciment utilisé lors de la production des bétons est le même pour chacune des formulations. Le dosage en ciment de la formation des bétons gardé constant tout le long du projet de recherche. Nous avons utilisé un ciment de type GU de la compagnie *Colacem Canada*. Les caractéristiques de ce ciment sont présentées en annexe (annexe n°11). Le dosage en ciment pour chaque formulation est de $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ conformément à la norme CSA A23.2-14A.

3.2.2 Granulats

Deux types de granulats sont utilisés dans ce projet. Un premier réactif permettant le développement de la RAS et un second considéré comme non réactif pour les autres formulations.

- Granulats *Placitas*

Dans le cas du béton développant la réaction alcalis-silice, il est nécessaire d'utiliser un granulat réactif permettant de l'influencer. Un granulat provenant du Nouveau-Mexique (États-Unis) est choisi, son nom est *Placitas*. Ce granulat est connu comme réactif [65] [9].

Une analyse pétrographique de ce granulat a été réalisée pour la *New Mexico State Highway & Transportation Department* [66]. Les mesures ont été réalisées selon la norme ASTM C295 (Tableau 3.1)

Tableau 3.1 - Analyse pétrographique de granulats dont un *Placitas* [66]

Percent	Edgewood 3/8"	Edgewood 1"	Placitas 1"	Tinaja 1"	Santa Ana 1"
Rhyolite/trachyte	2.6	0.0	6.3	0.0	4.7
Andesite	3.7	0.0	6.1	0.0	1.5
Dacite/basalt	18.5	0.0	28.0	0.0	11.2
Chert/chalcedony	13.6	0.6	19.3	0.1	7.0
Quartz	13.5	0.0	18.3	0.1	20.9
Feldspar	27.6	0.0	20.6	0.3	14.8
Ferromagnesian	1.2	0.0	0.9	0.0	0.5
Opaque	0.9	0.0	0.4	0.0	0.3
Limestone/dolomite	18.4	99.4	0.1	99.4	39.1
Total	100	100	100	100	100
Reactive	19.9	0.6	31.7	0.1	13.2
Weathered	11.2	7.9	9.2	1.9	12.5
Percent of whole	31.1	8.5	10.9	2.0	25.7

- Granulats pour les autres formulations

Les granulats utilisés pour les autres formulations proviennent de la carrière Saint-Dominique à Saint-Hyacinthe au Québec (Canada). Ils sont considérés comme non réactifs. Ces granulats sont donc utilisés pour la formulation servant de référence, et la formulation pour le béton exposé aux sulfates.

La fraction granulométrique de ces granulats est définie en copiant celle des granulats *Placitas*. La fraction obtenue est à 70% de 20 à 10 mm et 30% de 14 à 5 mm.

3.2.3 Sable

Le sable utilisé toutes les formulations de béton provient de la carrière Saint-François au Québec (Canada) commercialisé par la compagnie *Béton Provincial*. C'est un sable dont la fraction granulométrique est jusqu'à 5. Il est connu comme non réactif et est habituellement utilisé dans le laboratoire.

3.2.4 Eau

L'eau utilisée dans les formulations provient du robinet provenant de la ville de Sherbrooke, Québec (Canada).

3.2.5 NaOH

De la soude (NaOH) sous forme de granules a été ajoutée dans l'eau de gâchage des formulations développant la réaction alcalis-silice afin d'en accélérer le processus. La quantité de NaOH ajoutée permet d'obtenir 0,95% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ de la masse de ciment.

3.2.6 Sulfate de Sodium

Une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) est utilisée pour le béton subissant une attaque sulfatique externe. Il sera mélangé à de l'eau afin d'avoir une solution de trempage d'une concentration de 50 g/L (5%) conformément à l'ASTM C1012 [67].

3.3 QUANTITÉS DES MÉLANGES

Les quantités de béton produites sont fonction du nombre d'endommagements appliqués. C'est-à-dire que pour chaque endommagement il est nécessaire d'avoir des échantillons cylindriques et des prismatiques. Les échantillons cylindriques sont utilisés pour les essais suivants :

- Résistance à la compression, à la traction indirecte
- Module d'Young
- Vitesse de propagation des ondes de compression
- Essais acoustiques avec la méthode NRUS
- DRI

Les échantillons prismatiques sont utilisés pour les essais suivants :

- Masse et allongement
- Essais acoustiques avec la méthode NIRAS

Pour chaque combinaison d'endommagement et pour chaque essai (excepté les mesures du DRI), trois éprouvettes sont utilisées pour faire les mesures aux différentes échéances. Ces échéances sont décrites dans la section 3.7 *Caractérisation des endommagements* de ce chapitre. Ainsi, le nombre total des éprouvettes cylindriques et prismatiques produites pour chaque gâchée de béton est indiqué dans la figure 3.2.

Trois gâchées seront réalisées de la façon suivante (figure 3.2) :

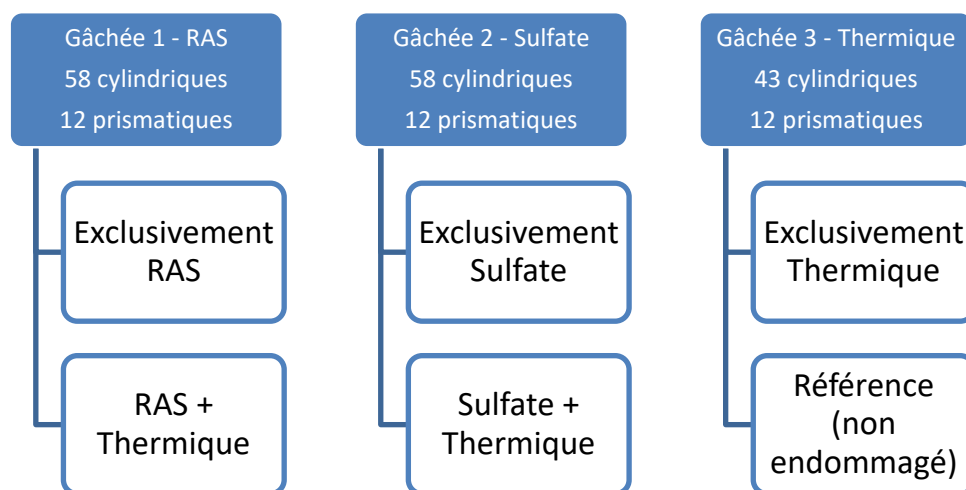


Figure 3.2 - Répartition de la production du béton en fonction des endommagements à réaliser

Les éprouvettes cylindriques ont pour dimension : 100*200 mm. Les éprouvettes prismatiques ont pour dimensions 75*75*300 mm.

Les dosages des bétons sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.2 – Formulation du béton atteint de la réaction alcalis-silice (gâchée n°1) et des autres bétons

Gâchée	1	2 et 3
E/C	0,5	0,5
Ciment [kg/m³]	420	420
Granulats [kg/m³]	850	966
Sable [kg/m³]	887	887
Eau [kg/m³]	210	210

3.4 FABRICATION

Les éprouvettes cylindriques et prismatiques sont confectionnées en même temps. Après la mise en place du béton dans les moules, un film plastique est placé au-dessus afin d'éviter l'évaporation de l'eau de gâchage. Les éprouvettes sont démoulées 24 heures après et conservées selon leurs conditions de conservation respectives (partie 3.5).

3.5 CONDITIONS DE CONSERVATION

La conservation des éprouvettes de béton est divisée en fonction des endommagements réalisés.

3.5.1 Conservation du béton de référence et endommagé thermiquement

Les échantillons de référence ont subi une cure humide jusqu'à 28 jours avant la réalisation des essais normalisés (résistance à la compression, module d'Young et résistance à la traction indirecte). La température de cure a été de 21°C. À la suite de ces essais, les échantillons étaient toujours conservés à une humidité relative ambiante de 100% et une température de 21°C jusqu'à la fin du protocole expérimental.

3.5.2 Conservation du béton développant la RAS

La conservation des éprouvettes développant la RAS s'est faite de la façon suivante :

- Conservation des moules recouverts d'un film plastique pendant 24h puis démoulage
- Conservation en chambre humide (100% HR) à 21°C pendant 28 jours.
- Début des essais de caractérisation destructifs tout en continuant le stockage des échantillons dans un environnement humide avec contrôle de la température.
- À la suite des 28 jours, les éprouvettes sont stockées dans trois contenants hermétiques (19 éprouvettes par contenant) et placés verticalement sur une grille au-dessus de quelques centimètres d'eau. Toute la surface intérieure du contenant est recouverte d'une

serviette humide afin de conserver une humidité relative proche de 100%. La température dans ces contenants est de 38°C (suivi de la norme CSA A23.2-14A).

La figure 3.3 résume cette procédure.

Pour les échantillons dégradés par RAS et par choc thermique, ce dernier est appliqué lorsque l'allongement des échantillons dû à la réaction est significatif, c'est-à-dire lorsqu'il est détecté par les autres méthodes (UPV, NRUS et NIRAS). Les variations d'expansion d'un échantillon atteint de la RAS ne sont pas constantes. La réaction doit se mettre en place au sein du matériau. Ensuite, le gel de silice formé comble la porosité et les fissures déjà présentes dans le matériau. Une fois les espaces occupés, le gel exerce des contraintes dans le matériau jusqu'à la fissurer. L'application des chocs thermiques se fera à ce moment précis.

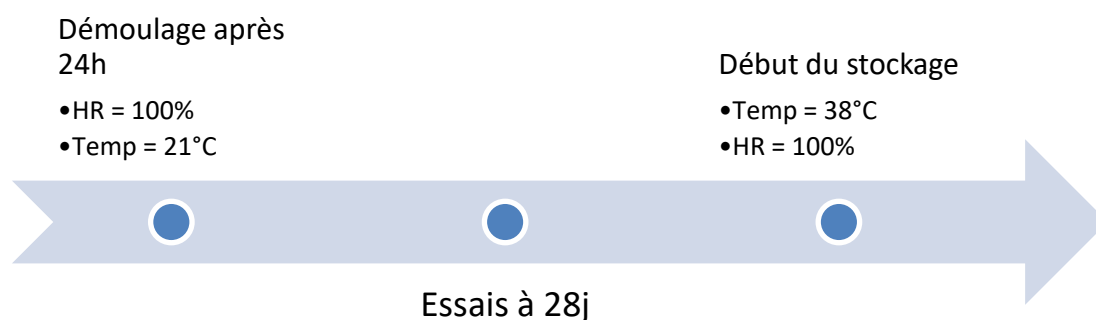


Figure 3.3 - Résumé des conditions de conservation pour les éprouvettes RAS

3.5.3 Conservation du béton exposé aux sulfates

La conservation du béton exposé aux sulfates s'est faite de la façon suivante :

- Conservation des moules recouverts d'un film plastique pendant 24h puis démoulage
- Conservation des éprouvettes pendant 28 jours à température ambiante (21°C) et en chambre humide (100% d'humidité relative).
- À 28 jours les essais de caractérisation destructifs sont réalisés (module d'Young et résistance à la compression et traction indirecte)

- Exposition des éprouvettes à la solution sulfatique :
Ensuite, les éprouvettes sont placées verticalement dans des bacs contenant la solution sulfatique. La quantité de solution est déterminée de façon à ce que les éprouvettes soient totalement immergées. Les bacs sont ensuite fermés hermétiquement. Les éprouvettes ne sont pas en contact direct avec le bac. Elles sont supportées par une grille en plastique. La concentration de la solution est de 5% (50 g/L).
La solution est renouvelée mensuellement afin de maintenir un pH stable (entre 6 et 8). Les mesures de pH sont faites grâce à un pH-mètre.
- Les bacs contenant les éprouvettes et la solution sulfatique sont conservés à température ambiante du laboratoire.
- Cycle de séchage / mouillage
Hebdomadairement, les éprouvettes sont placées dans une salle à 50% d'humidité relative pendant 24 heures afin de les sécher. Ensuite, les éprouvettes sont replacées dans leur environnement de stockage initial exposé aux sulfates.

La figure 3.4 résume cette procédure.

Des vérifications sont réalisées afin de s'assurer qu'il n'y a pas évaporation de la solution sulfatique.

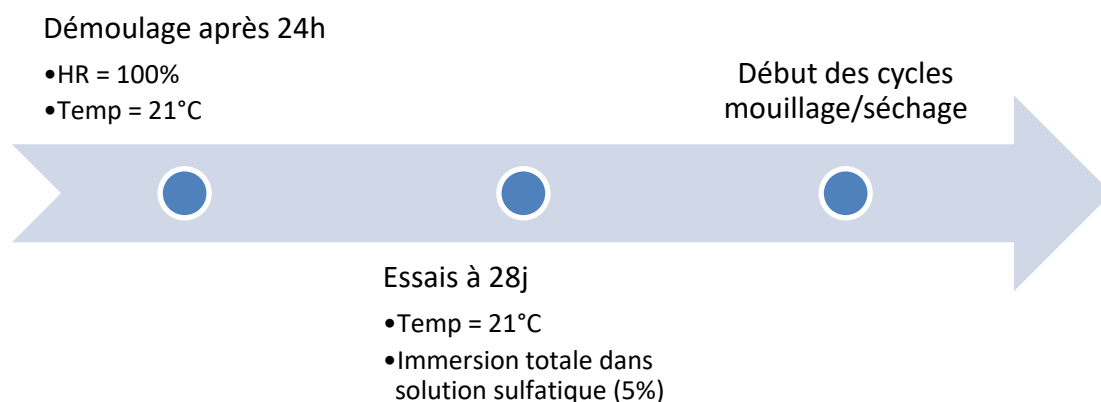


Figure 3.4 - Résumé des conditions de conservation pour les éprouvettes ESA

Il est important de noter quand dans tous les cas d'endommagements, une cure de 28 jours est réalisée à température ambiante ($\approx 21^{\circ}\text{C}$) et à 100% HR. Cela permet d'assurer que les éprouvettes ont le même état saturé lors des essais de caractérisation initiale à 28 jours.

3.6 PROTOCOLE D'ENDOMMAGEMENT THERMIQUE

Les éprouvettes ayant subi un endommagement thermique (choc thermique) ont suivi le protocole suivant :

Les éprouvettes sont d'abord chauffées à 150°C pendant trois heures 120 jours après le gâchage. Puis, les éprouvettes sont immergées dans l'eau à la température ambiante du laboratoire ($\approx 20^{\circ}\text{C}$) pendant dix minutes. Ensuite, les éprouvettes sont replacées dans leurs conditions de stockages respectives. Le chauffage des échantillons se fait à sec pour des raisons de simplicité. Il n'était pas possible au laboratoire de chauffer en conservant un environnement avec 100% d'humidité relative. La raison est le nombre d'éprouvettes devant subir l'endommagement thermique simultanément. Une caractérisation non destructive est faite avant et après un choc thermique afin de comparer l'influence de celui-ci.

3.7 CARACTÉRISATION DES ENDOMMAGEMENTS

La caractérisation des endommagements a été réalisée avec des méthodes destructives et non destructives. Les essais destructifs regroupent les essais conventionnels de mesure de propriétés mécaniques: résistance à la compression, module d'Young statique et résistance à la traction indirecte (fendage). Les échéances initialement prévues étaient 28 jours, 34, 44 et 62 semaines. Cependant, des modifications ont dû être faite suite à une remise en question de la pertinence des essais à long terme (34, 44 et 62 semaines). La dégradation des éprouvettes atteintes de la RAS s'est développée plus rapidement qu'il n'était prévu. Les échéances ont donc été adaptées en fonction de l'évolution des endommagements. Les nouvelles échéances sont les suivantes : 34, 40 et 44 semaines.

Les essais non destructifs regroupent le suivi de paramètres tels que la variation de la masse et de l'allongement des éprouvettes. Des mesures de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores ont été faites. Le coefficient de non-linéarité acoustique est aussi mesuré grâce à deux méthodes : la méthode NRUS (*Resonant Nonlinear Ultrasound Spectroscopy*) et la méthode NIRAS (*Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy*).

3.8 ESSAIS DESTRUCTIFS

Les essais destructifs réalisés sont la résistance à la compression, à la traction indirecte (Brésilien) et détermination du module d'Young. Les essais sont réalisés en suivant les différentes normes ASTM (tableau 3.3). Les éprouvettes en béton sont sorties de leur environnement de conservation le jour même des essais. Avant celui-ci, des mesures de masse, diamètre et longueur sont faites.

Tableau 3.3 - Normes utilisées pour la réalisation des essais destructifs

Résistance à la compression	ASTM C39
Résistance à la traction indirecte	ASTM C496
Module d'Young	ASTM C469

3.9 ESSAIS NON DESTRUCTIFS

Différents paramètres sont suivis afin de réaliser la caractérisation des endommagements.

Comme nous l'avons vu dans la revue bibliographique, le suivi de la masse et de l'allongement est important dans le développement des réactions de l'allongement interne et spécifiquement pour la réaction alcalis-silice.

3.9.1 Suivi de masse et de l'allongement

Dans ce projet, le suivi de la masse permet de suivre l'absorption de l'eau par les éprouvettes.

Le suivi de masse se fait toujours avec la même balance au laboratoire. Les fréquences de mesure se font en respectant la norme CSA A23.2-14A.

Le suivi de l'allongement se fait en respectant les fréquences de mesure de la norme CSA A23.2-14A. L'outil utilisé est le même tout au long du programme expérimental. L'allongement des éprouvettes est mesuré grâce à un extensomètre. Les éprouvettes en question sont équipées de plots métalliques à leurs extrémités pour pouvoir faire les mesures. Les éprouvettes prismatiques sont prévues à cet effet.

Dans le cas des éprouvettes exposées à la solution sulfamique, nous utilisons bien les éprouvettes prismatiques prévues à cet effet (75*75*300 mm). Il est important de mentionner que l'ASTM C1012 demande de suivre l'ASTM C490 [68] quant à la taille des éprouvettes prismatiques pour les mesures de l'allongement. Cette dernière demande de choisir des éprouvettes prismatiques de 25*25*285mm. Dans ce projet, toutes les mesures de l'allongement sont réalisées avec des éprouvettes 75*75*300mm comme mentionné dans la norme CSA A23.2-14A.

3.9.2 Damage Rating Index

Les éprouvettes utilisées pour le DRI sont sciées longitudinalement. La surface interne sciée est polie grâce à des poudres abrasives de différentes dimensions. Les tailles utilisées sont 150, 300 et 600 μm . Après chaque changement de poudre, les échantillons sont nettoyés afin de limiter leur présence dans les pores et fissures. Un maillage de 1 cm^2 est ensuite tracé sur la surface polie avant l'observation au stéréomicroscope.

Le DRI est réalisé à la fin du protocole expérimental soit 44 semaines après le gâchage.

3.9.3 Microscope Électronique à Balayages (MEB)

Des observations de fragments d'éprouvettes ont été observées au MEB. Les observations ont pour objectif la visualisation microscopique d'échantillons de béton. Cela a été réalisé au Centre de Caractérisation des Matériaux de l'Université de Sherbrooke. L'appareil est un Microscope électronique à balayage à pression variable (MEBVP), modèle S-3000N de la compagnie *Hitachi*. La distance de travail et le grossissement sont indiqués sur les images dans le chapitre Résultats (chapitre 4).

Les observations aux MEB ont été faites suite à la présence de fissurations anormales dans les éprouvettes de référence ayant subi un choc thermique. Il a été décidé de faire des observations au MEB pour savoir si des produits de réaction de gonflement interne (comme de l'ettringite) étaient présents dans ces éprouvettes. Les observations ont été comparées à des éprouvettes n'ayant pas subi le choc thermique et à l'endommagement RAS. Les éprouvettes atteintes de ESA n'ont pas été observées au MEB car lors de la fin du protocole expérimental elles ne présentaient aucun endommagement.

3.9.4 Vitesse de propagation des ondes de compression

Ces mesures sont faites avec un appareil de type *Pundit* de la marque *Proceq* (modèle *Pundit Lab*). Nous mesurons la taille des éprouvettes cylindriques dédiées à cet effet et le temps de propagation des ondes de compression par transmission directe entre l'émetteur et le receveur. Avec ces deux données, nous déterminons la vitesse. Les fréquences de mesure sont similaires aux mesures de masse et de l'allongement.

Le couplant utilisé entre le matériau et les capteurs est la mélasse : «*mixture résultant du raffinage du sucre extrait de la betterave sucrière ou de la canne à sucre*» [69].

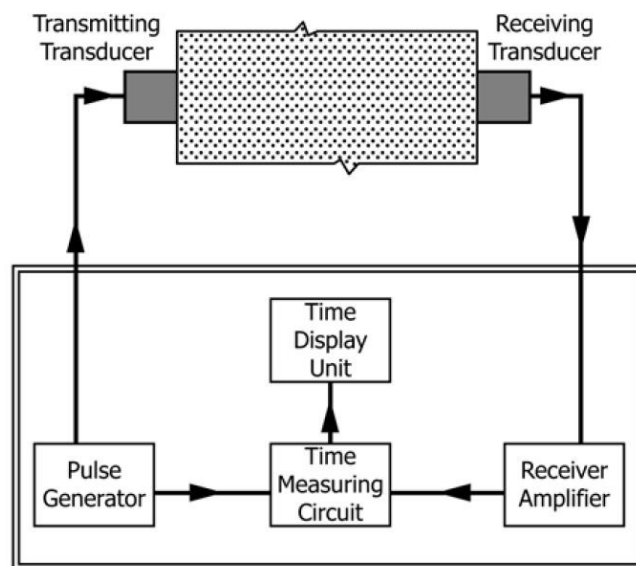


Figure 3.5 - Schéma de l'appareillage pour les mesures de vitesse de propagation des ondes de compressions

Comme il est mentionné dans la littérature, le suivi de la vitesse de propagation permet d'estimer rapidement l'évolution de l'intégrité du béton. L'émetteur et le receveur de cet appareil sont des transducteurs dont la fréquence maximale d'émission et de réception est de 54 kHz. Cela respecte la norme ASTM C597 [70].

3.9.5 Acoustique non linéaire – NRUS

Deux méthodes sont utilisées dans le cas de la caractérisation par acoustique non linéaire. La première est la méthode *Resonant Nonlinear Ultrasound Spectroscopy* (NRUS) [71] [9].

Les éprouvettes cylindriques sont utilisées pour cet essai. Dans le cas des éprouvettes REF et RAS, les éprouvettes sont exposées 24 heures avant les mesures aux conditions du laboratoire (température et humidité relative). L'objectif étant de faire diminuer l'humidité relative des éprouvettes compte tenu de l'influence de l'humidité sur la non linéarité du béton [6]. Ce n'est

pas le cas pour les éprouvettes ESA car les essais sont réalisés après les cycles de séchage. La génération d'impact avec cette méthode se fait avec un transducteur piézoélectrique. Les travaux de Kodjo [6] ont permis de caractériser l'actionneur piézoélectrique qui est utilisé. L'intervalle fréquentiel de travail est inférieur à 20 kHz et celui de l'actionneur supérieur. Pendant les essais, il est donc certain de mesurer la fréquence de résonance de l'éprouvette en béton. Le receveur est un accéléromètre piézoélectrique de la marque *Brüel & Kjaer* de fréquence de résonance 45 kHz. Les capteurs sont collés avec de la colle chaude à l'aide d'un pistolet à colle.

Un premier balayage fréquentiel rapide (#1) est réalisé pour avoir une estimation de la fréquence de résonance du matériau. Ce premier balayage est de 8 000 et 10 000 Hz par intervalle de 50 Hz à une amplitude de 100 mV. Un deuxième balayage (#2) permet d'avoir une estimation plus précise de la fréquence de résonance avant de commencer l'acquisition. Ce deuxième balayage se situe 100 Hz en dessous et au-dessus de la fréquence précédemment obtenue. L'intervalle est de 10 Hz à une amplitude de 100 mV. Si la fréquence de résonance se situe à équidistance des bornes de l'intervalle fréquentiel défini alors l'acquisition est prête à démarrer. L'acquisition (balayage #3) se fera tous les Hertz. Cette procédure est résumée dans le tableau suivant (tableau 3.4).

Tableau 3.4 - Résumé des balayages fréquents réalisés lors de l'essai NRUS

Balayage	Balayage fréquentiel (Hz)	Amplitude (mV)
#1	8 000 à 10 000 par 50	100
#2	$f_r - 100 < f_r < f_r + 100$ par 10	100
#3	$f_r - 100 < f_r < f_r + 100$ par 1	100 à 800 par 50

f_r étant la fréquence de résonance estimée.

L'acquisition du signal dans le cas de l'essai NRUS se fait dans le domaine temporel. Le logiciel d'acquisition produit directement une transformée de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) pour obtenir le signal dans le domaine fréquentiel.

Une fois l'acquisition des données terminée, elles sont traitées sous le logiciel *Matlab* afin d'obtenir pour chaque éprouvette la fréquence de résonance à différentes amplitudes. Une première comparaison et analyse des valeurs est possible. Le coefficient de non-linéarité acoustique α est calculé dans un deuxième temps. Il est obtenu avec l'équation suivante:

$$\frac{f_0 - f}{f_0} = \alpha \cdot A \quad (4)$$

Où f_0 est la fréquence de résonance linéaire, f la fréquence de résonance à l'amplitude sollicitée. A est l'amplitude de l'accélération.

3.9.6 Acoustique non linéaire – NIRAS

La deuxième méthode est la méthode *Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy* (NIRAS) [72] [55].

Les éprouvettes utilisées sont celles prismatiques. Lors de l'essai, l'éprouvette est placée sur un tapis en mousse afin que les vibrations de l'éprouvette ne soient pas affectées par le support (figure 3.6). L'essai réalisé a pour but de mesurer la fréquence de résonance de l'éprouvette grâce à la propagation des ondes longitudinales et transversales dans le matériau.

La configuration de l'essai se fait en suivant la norme ASTM C215 selon les modes transversaux et longitudinaux. Les impacts sont générés grâce à deux billes de diamètres différents (une première de 12 mm et une deuxième de 18 mm). Cela permet de générer des ondes avec davantage de fréquences. De plus, une bille avec un plus grand diamètre permet d'avoir des ondes de plus grandes amplitudes.

Le receveur est un accéléromètre piézoélectrique placé à l'extrémité de l'éprouvette en fonction du mode utilisé. L'accéléromètre est le même que celui utilisé avec la méthode NRUS.

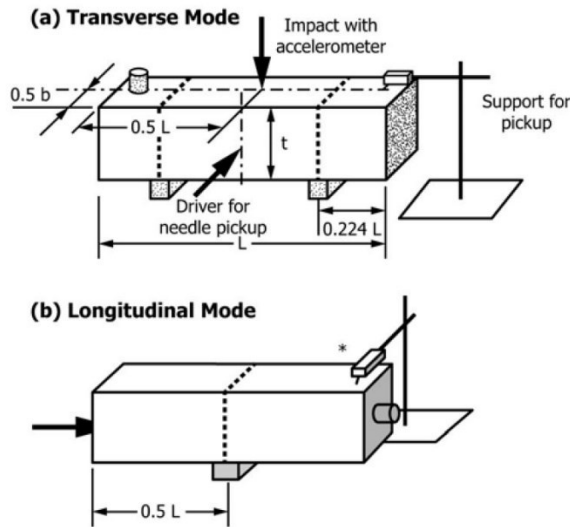


Figure 3.6 - Configuration de l'essai NIRAS pour les modes transversaux (a) et longitudinaux (b) (ASTM C215)

Quinze coups d'amplitude croissante sont générés pour chaque essai et pour chaque éprouvette. Cependant, les coups étant générés manuellement, il peut y avoir des erreurs. Certains coups peuvent ne pas avoir une amplitude supérieure au précédent. C'est pour cette raison que lors du traitement des données sur le logiciel *Matlab*, une sélection des coups ayant une amplitude croissante est faite.

Dans le cas des essais NIRAS, l'acquisition du signal est dans le domaine fréquentiel. Un traitement sous le logiciel *Matlab* permet la détermination des fréquences de résonance pour chaque coup donné pour chacun des échantillons. Une première analyse comparative est faite avec ces données. Par la suite, le coefficient de non-linéarité acoustique α est déterminé avec l'équation 4 indiquée précédemment.

4 RÉSULTATS

Pour chacune des parties ci-dessous, les résultats sont présentés selon les types d'endommagement (référence, RAS et ESA). La comparaison des valeurs et l'interprétation se trouvent au chapitre 5 (Interprétation et Analyse). Mentionnons que les abréviations suivantes sont utilisées :

- CT = Choc Thermique
- PCT = Pas de Choc Thermique

4.1 ESSAIS CONVENTIONNELS

Cette partie présente les résultats des essais destructifs (résistance à la compression et à la traction indirecte, module d'Young) ainsi que les valeurs de variations de masse et d'allongement.

4.1.1 Masse

- Référence

L'évolution de la masse des éprouvettes de référence (figure 4.1) augmente après le gâchage et se stabilise à partir du 80^e jour en dessous de 0,30%. Cette augmentation à jeune âge de la masse (avant 28 jours) est liée à l'absorption de l'eau externe due à la contraction de Le Châtelier résultant de l'hydratation du ciment, étant donné que les éprouvettes sont maintenues à 100% HR. Lors du choc thermique à 120 jours (indiqué par la ligne noire verticale sur la figure), on observe une perturbation : la masse des éprouvettes CT (en orange). La masse moyenne passe de 0,26% à 1,01%. Cependant, l'augmentation n'est pas homogène à long terme pour une des éprouvettes dans le cas de la masse (éprouvette CT2). La masse des éprouvettes PCT (en vert) n'évolue pas, elle reste constante (en dessous de 0,30%).

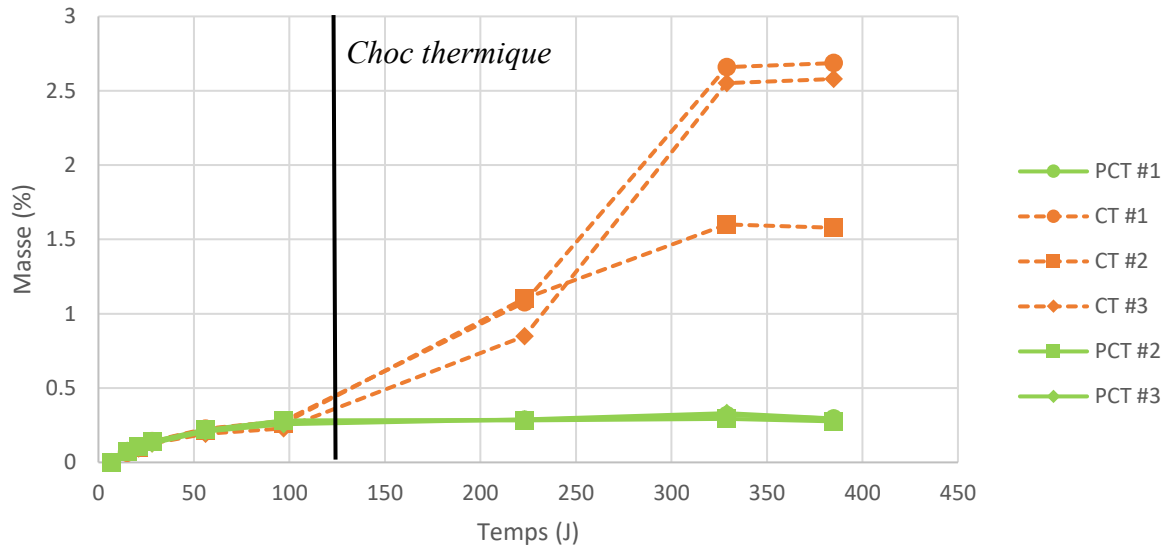


Figure 4.1 - Évolution de la masse des éprouvettes de référence

- RAS

Pour les éprouvettes atteintes de la RAS (figure 4.2), il y a augmentation globale de la masse après le gâchage jusqu'à 120 jours : 1% par rapport à la date initiale. Cependant, il y a des variations entre les valeurs : à 56 jours, la différence entre la valeur maximale et minimale est de 50%. Celles-ci sont plus importantes que pour les éprouvettes de référence (saines). De même, une variation négative a lieu entre 7 et 14 jours : la masse des éprouvettes diminue, il y a une baisse de 0,13%.

À 126 jours, la masse des éprouvettes PCT (en vert) n'a pas varié comparativement aux mesures précédentes. La masse de celles CT (en orange pointillé) diminue pour la totalité des échantillons (diminution moyenne de 48%) après l'application du choc thermique. Ces mesures ont été débutées 6 jours après le choc thermique (126 jours après le gâchage).

Pour les mesures qui suivent le choc thermique à long terme, la masse des éprouvettes PCT diminue significativement. Pour deux des éprouvettes (PCT2 et PCT3), les masses finales mesurées sont inférieures à celles initiales (valeur moyenne de -0,1% par rapport à la valeur initiale). Pour les éprouvettes CT la masse augmente par rapport à la dernière mesure (126 jours)

jusqu'à atteindre un pic à 329 jours (respectivement 1,2%, 2,3% et 1,1%). Au-delà, la masse diminue.

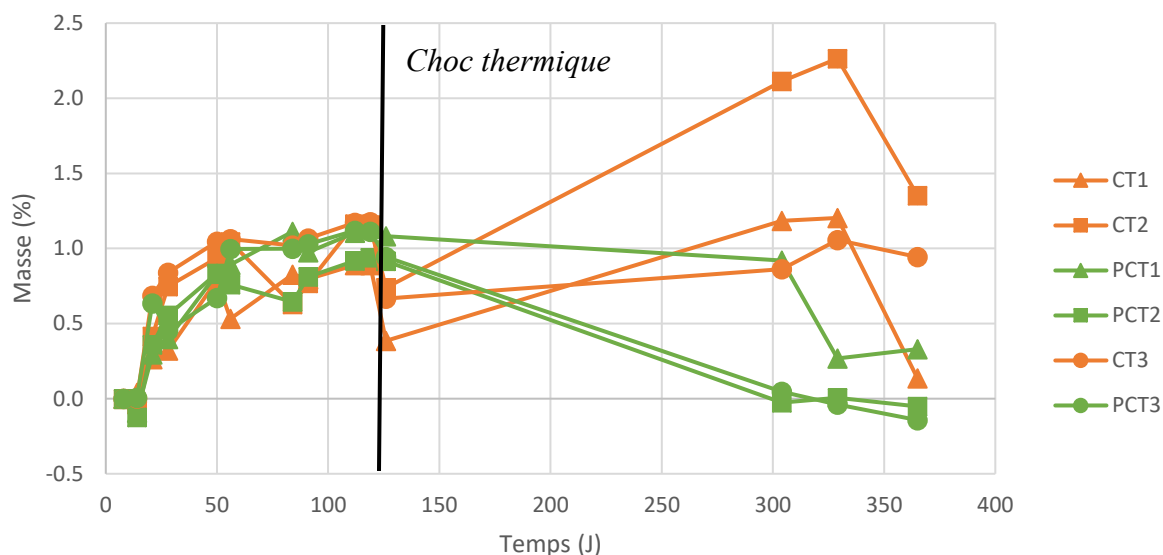


Figure 4.2 - Évolution de la masse des éprouvettes RAS

La masse des éprouvettes CT est réduite dans les premiers jours suivant l'application du choc thermique réduit. Cela s'explique par le chauffage des éprouvettes induisant une perte d'eau dans celles-ci. À long terme, les éprouvettes CT ont une récupération des valeurs pré-choc thermique. Cependant, de grandes variations sont observables le long des essais. Au contraire, les éprouvettes PCT ont une tendance baissière à long terme. Elles retrouvent des valeurs proches de celles initiales après le gâchage. Les éprouvettes étant à 100% HR selon le protocole, il n'y a pas de raison pour que ces baisses aient lieu.

- ESA

L'évolution de la masse des éprouvettes ESA avant 120 jours (figure 4.3) est comparable à celles des autres éprouvettes. Il y a une augmentation initiale pour toutes les éprouvettes pendant les 20 jours suivant la gâchée. L'augmentation est de 0,9% en moyenne en 7 jours. La raison est la

prise d'eau par la matrice cimentaire pour son hydratation, facilitée par la solution de stockage en eau avant les essais destructifs à 28 jours. Il y a ensuite une stabilisation, les masses des éprouvettes ne changent plus. Les valeurs se maintiennent entre 0,8% et 1,1%.

L'application du choc thermique à 120 jours après la gâchée n'affecte pas l'évolution des valeurs à court terme. Les valeurs à 126 jours ne montrent pas de différence entre les éprouvettes CT et PCT. Les valeurs d'évolution de masse sont toujours entre 0,8% et 1,1%.

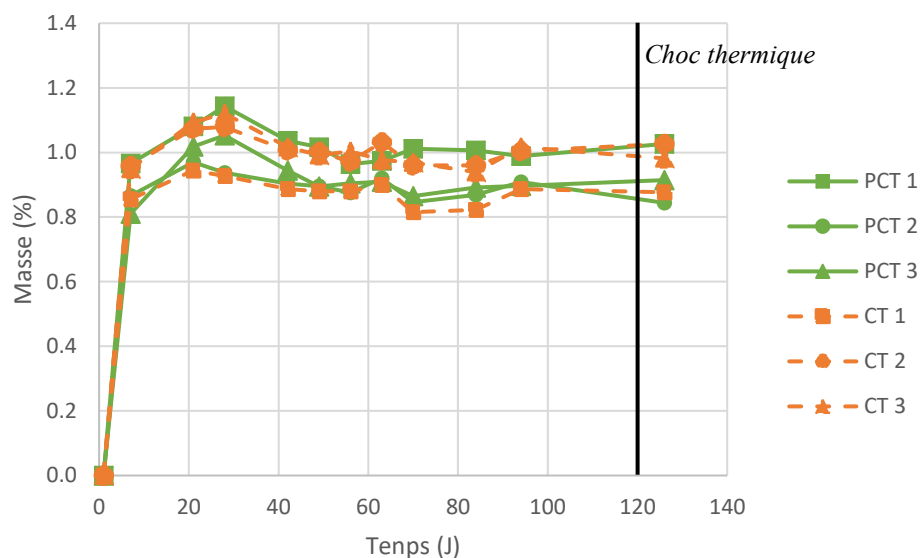


Figure 4.3 - Évolution de la masse des éprouvettes ESA

4.1.2 Allongement

- Référence

L'évolution de l'allongement des échantillons REF est montrée en deux graphiques; un premier avant le choc thermique à 120 jours (figure 4.4) et un second après ce choc thermique (figure 4.5). Le graphique avant le choc thermique montre une augmentation de l'allongement dans les

sept premiers jours suivant le gâchage (valeur moyenne de 0,008%). Par la suite, l'évolution est constante : entre 0,004% et 0,014% selon les éprouvettes.

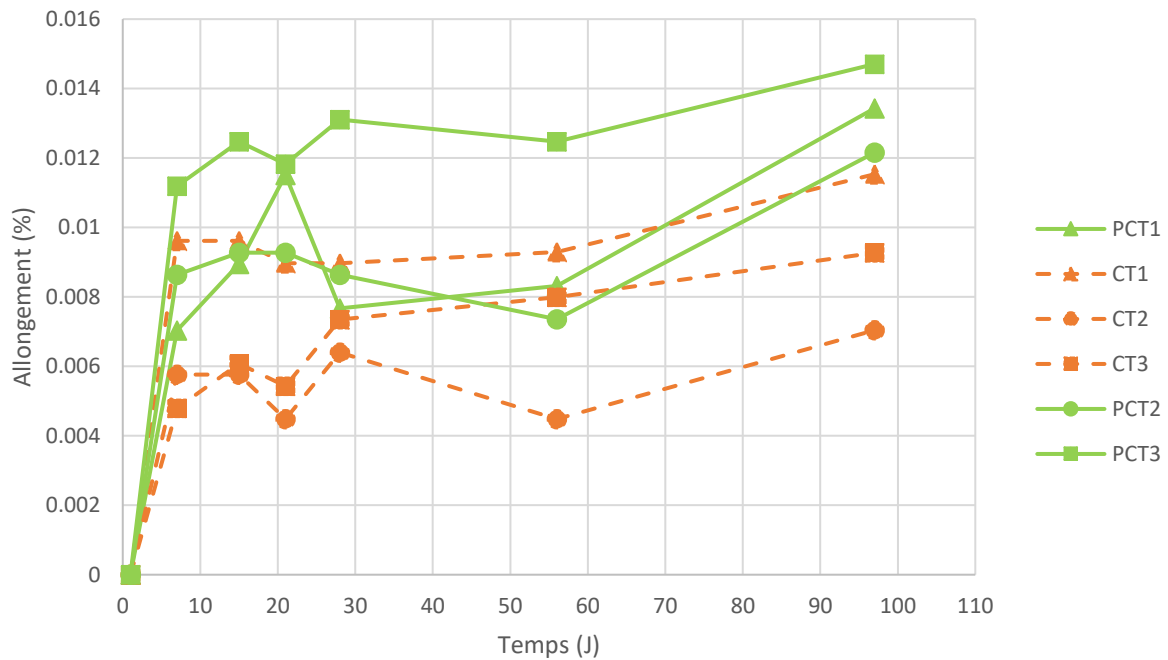


Figure 4.4 - Évolution de l'allongement des éprouvettes de référence (préchoque thermique)

À la suite du choc thermique, l'allongement des éprouvettes CT augmente de façon considérable. Il y a un passage de 0,009% à 0,677%, voire 0,75% pour certaines éprouvettes à la date de 223 jours. Il est important de considérer qu'entre les dates de 97 jours et 223 jours il n'y a pas eu de mesures. Cela ne permet pas d'analyser la période post-choc thermique à court terme. Au-delà de 223 jours, les éprouvettes CT1 et CT3 n'ont pas de valeurs, car l'allongement est tellement important qu'il n'est plus mesurable par l'extensomètre. Les éprouvettes PCT ont une tendance constante après la date des 120 jours.

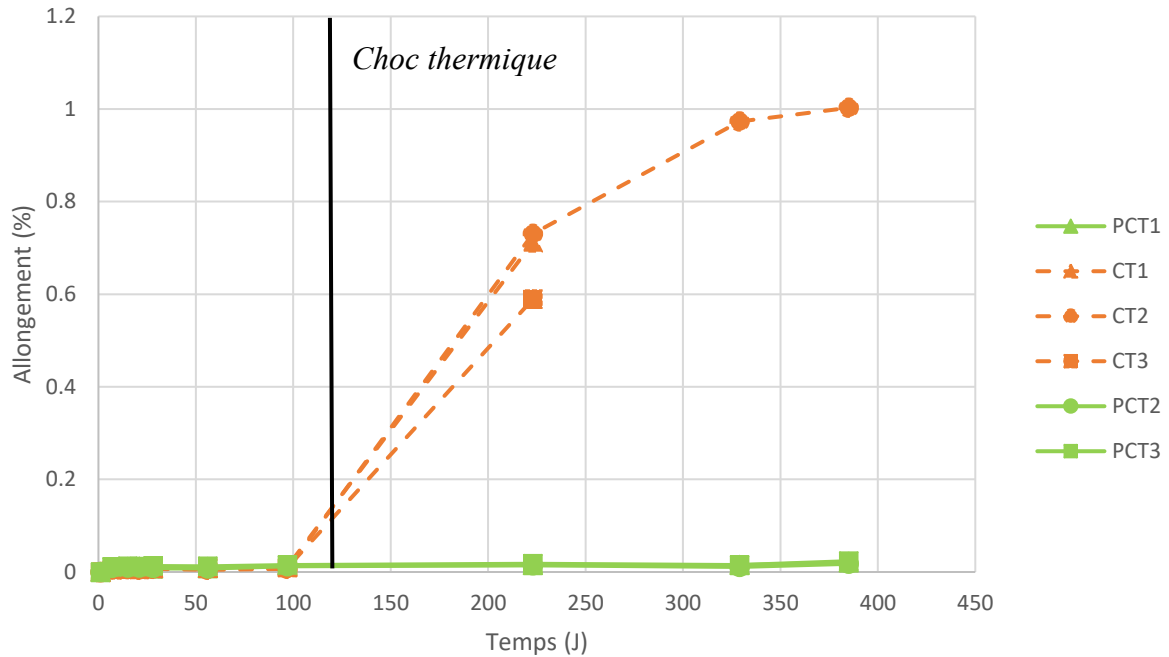


Figure 4.5 - Évolution de l'allongement des éprouvettes de référence (post-choc thermique)

- RAS

Pour les éprouvettes RAS, deux graphiques permettent de visualiser l'évolution de l'allongement. Le premier (figure 4.6) montre les valeurs avant le choc thermique. Le deuxième (n°13) après celui-ci. Dans le cas des valeurs avant le choc thermique, il y a une augmentation de l'allongement depuis le début. À 50 jours, l'allongement maximal est de 0,013% pour PCT2 et de 0,045% pour CT3. A+u-delà de 50 jours, l'évolution est moins importante avec une augmentation moyenne de 0,012% entre 50 et 119 jours.

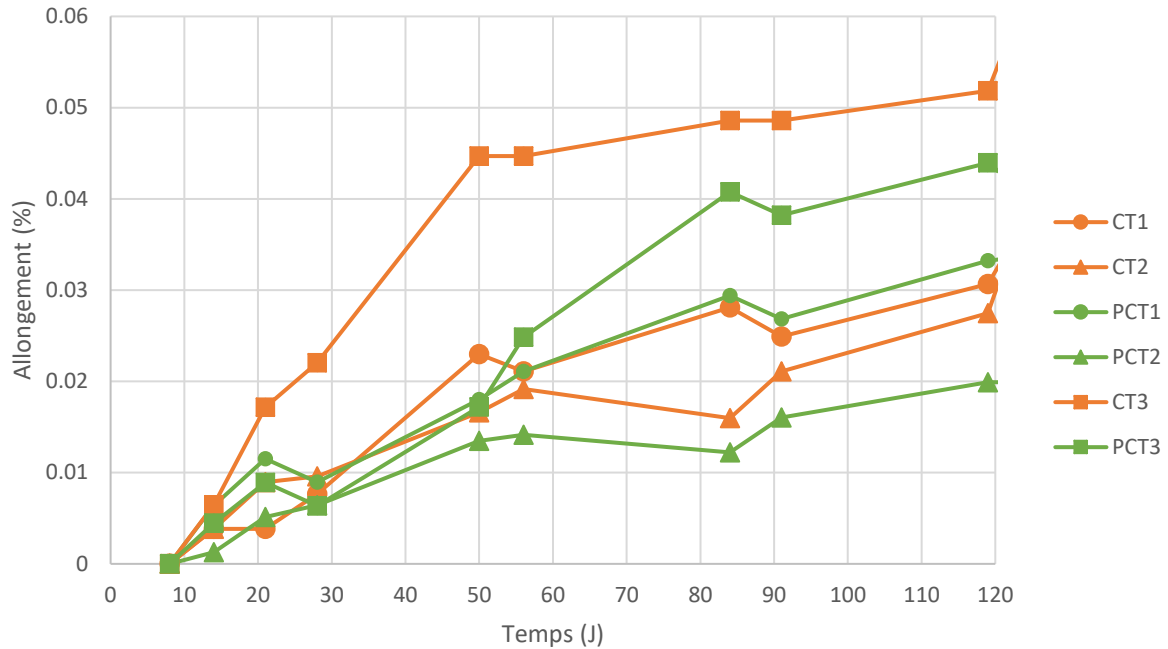


Figure 4.6 - Évolution de l'allongement des éprouvettes RAS (préchoque thermique)

À la suite du choc thermique, l'allongement des éprouvettes PCT ne varie pas et continue sur la même tendance comparativement aux valeurs préchoque thermique. Toutes les éprouvettes CT montrent une augmentation de leur allongement après le choc. Entre 126 et 365 jours, les éprouvettes PCT ont un allongement qui diminue légèrement : passage de 0,04% à 0,03% pour une éprouvette ou bien qui maintiennent leur tendance (PCT1 et PCT3). L'éprouvette PCT2 a une perte significative de l'allongement: passage de 0,02% à 0,008%.

Dans le cas des éprouvettes CT, pour deux des éprouvettes (CT2 et CT3) l'allongement augmente considérablement passant respectivement de 0,066% et 0,043% à 0,81% et 0,95%. Dans le cas de CT1, l'allongement est tellement important au-delà de 126 jours qu'il n'est plus mesurable avec l'extensomètre. C'est pour cette raison que la courbe n'est pas visible sur la figure 4.7.

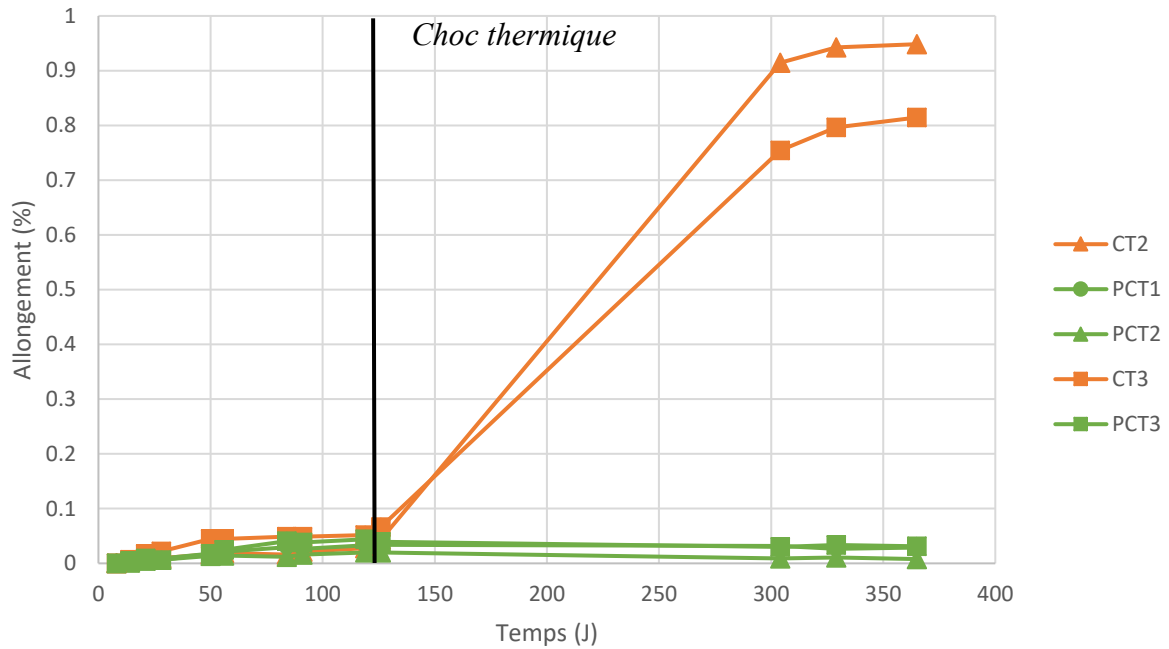


Figure 4.7 - Évolution de l'allongement des éprouvettes RAS (post-choc thermique)

Globalement, les variations d'allongement permettent de confirmer que l'ajout d'un endommagement aux éprouvettes CT a un effet à long terme sur ce paramètre. L'augmentation de l'allongement et la baisse des vitesses de propagation des ondes de compression avec la méthode UPV (chapitre 4.2) montrent le développement de la RAS dans les éprouvettes. Cependant, l'importance des allongements à long terme dans le cas des CT devrait être étudiée. Celle-ci a été considérée par le laboratoire comme très importante et donc a fait l'objet d'essais complémentaires (comme des observations aux MEB).

- ESA

Les valeurs de variation d'allongement des éprouvettes ESA (figure 4.8) ont une tendance haussière pendant les 21 premiers jours suivant le gâchage à l'exception d'une éprouvette (CT 1). En effet, cette dernière ne présente pas d'évolution d'allongement jusqu'à 21 jours. La tendance haussière présente une grande dispersion : à 7 jours une éprouvette à un allongement de 0,003% (CT 3) et une autre (CT 2) à 0,01%, soit une augmentation plus de 3 fois supérieure. Au-delà de 21 jours, la tendance est baissière jusqu'à 56 jours : passage d'une moyenne de 0,006% à 0%. À 94 jours, soit la dernière mesure avant l'application du choc thermique, la valeur moyenne est de 0,004%.

L'application du choc thermique affecte l'allongement des éprouvettes CT. Leurs valeurs moyennes passent de 0,003% à 94 jours à 0,021% à 126 jours. À l'inverse, les valeurs des éprouvettes PCT sont de 0,008% à 126 jours. Il y a donc une distinction entre les éprouvettes PCT et CT.

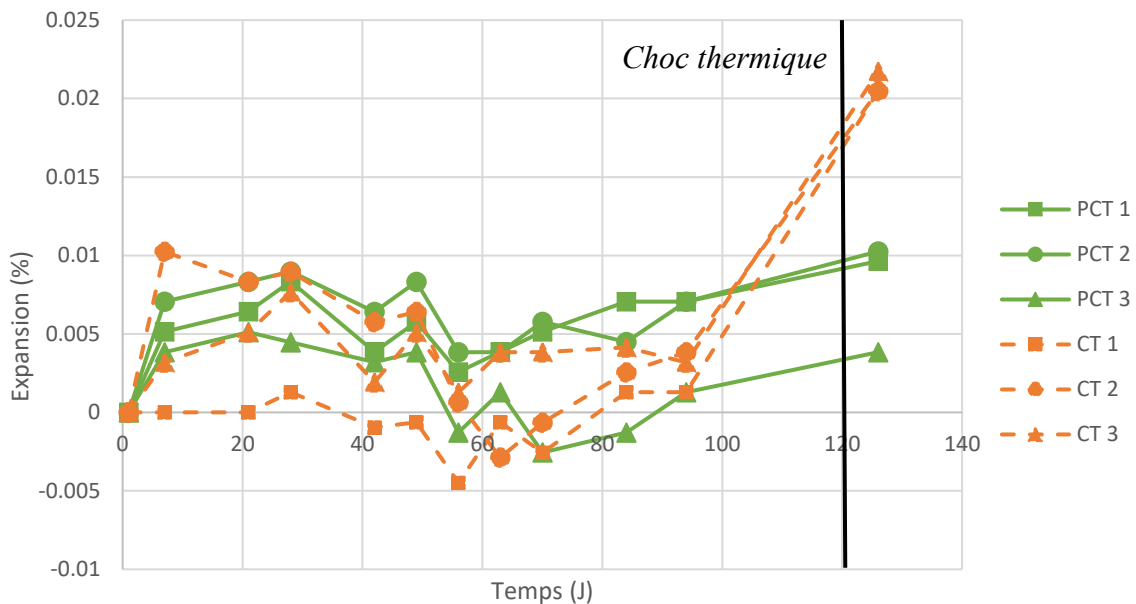


Figure 4.8 - Évolution de l'allongement des éprouvettes ESA

4.1.3 Résistance à la compression

Les résultats détaillés des mesures de résistance à la compression aux différentes échéances sont donnés aux tableaux 8.1 à 8.5 présentés dans l'annexe 8.

Les deux graphiques suivants (figures 4.9 et 4.10) présentent les résultats des résistances à la compression en fonction du temps pour chaque type d'endommagement. Les marqueurs supérieurs et inférieurs à chaque valeur correspondent aux valeurs maximales et minimales à chaque échéance. Le tableau 4.1 présente les valeurs pour l'endommagement ESA 28 jours après le gâchage.

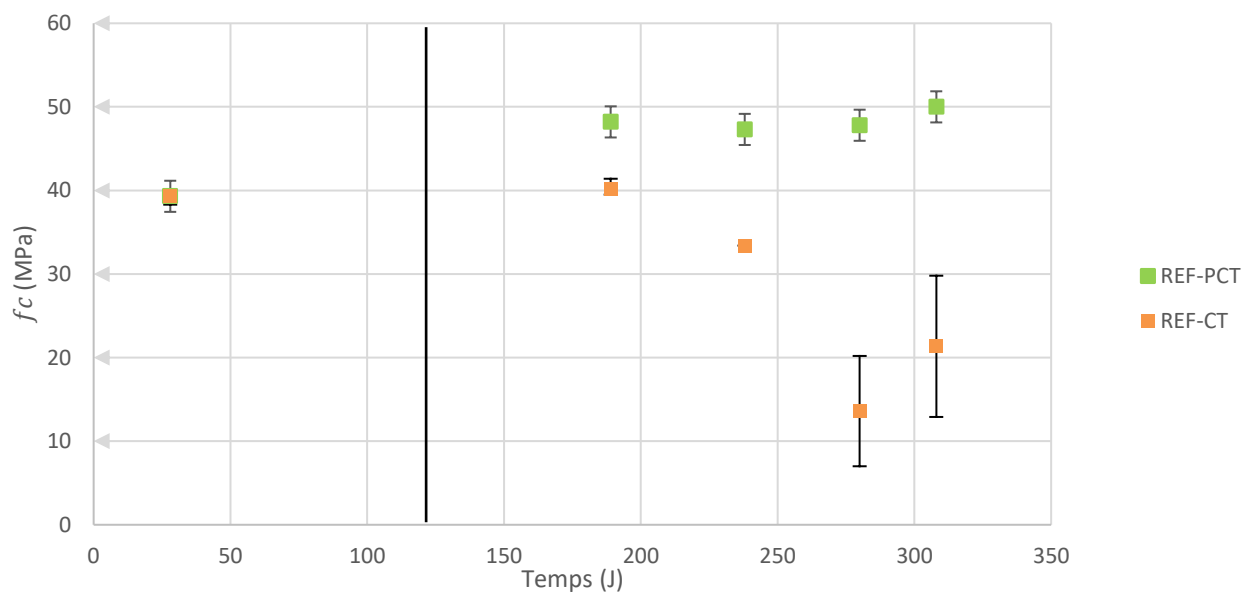


Figure 4.9 - Évolution de la résistance à la compression moyenne pour les éprouvettes de référence

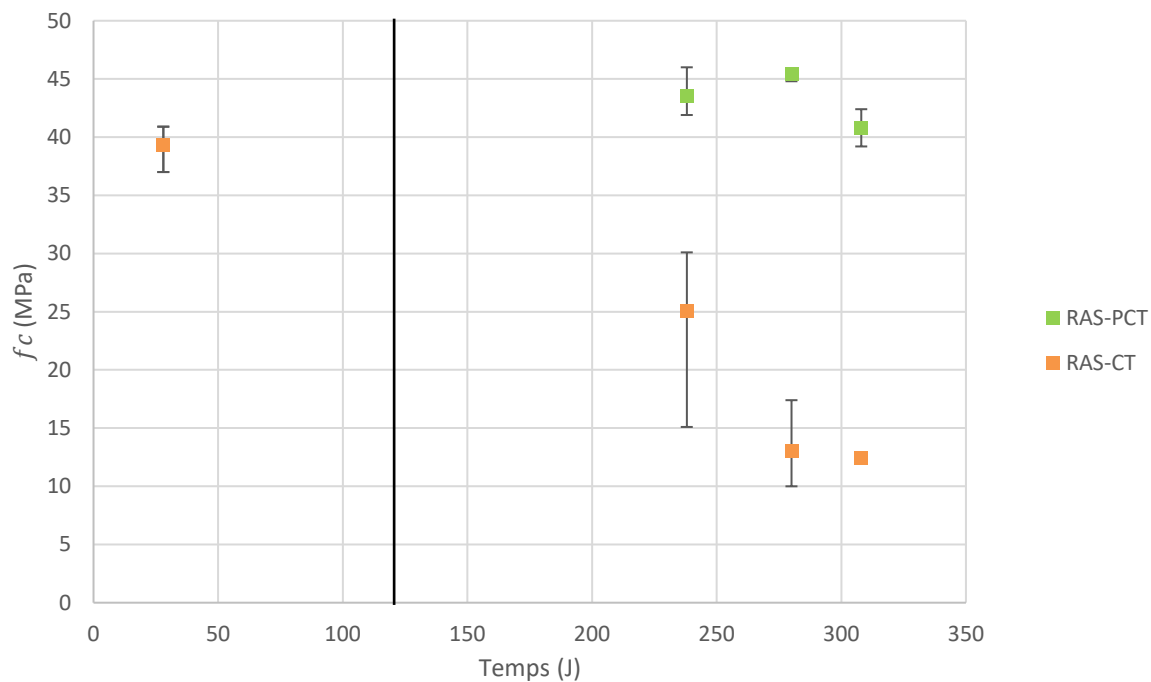


Figure 4.10 - Évolution de la résistance à la compression moyenne pour les éprouvettes RAS

Tableau 4.1 - Résistance à la compression des éprouvettes ESA à 28 jours

ESA (MPa)	
Éprouvette 1	39,2
Éprouvette 2	36,9
Éprouvette 3	37,9
Moyenne	38,0

4.1.4 Module d'Young

Les résultats détaillés des mesures du module d'Young aux différentes échéances sont donnés aux tableaux 8.6 à 8.10 présentés dans l'annexe 9.

Les deux graphiques suivants (figure 4.11 et 4.12) présentent l'évolution du module d'Young en fonction du temps pour chaque endommagement (RAS et REF). Le tableau 4.2 présente les résultats pour les éprouvettes ESA à 28 jours.

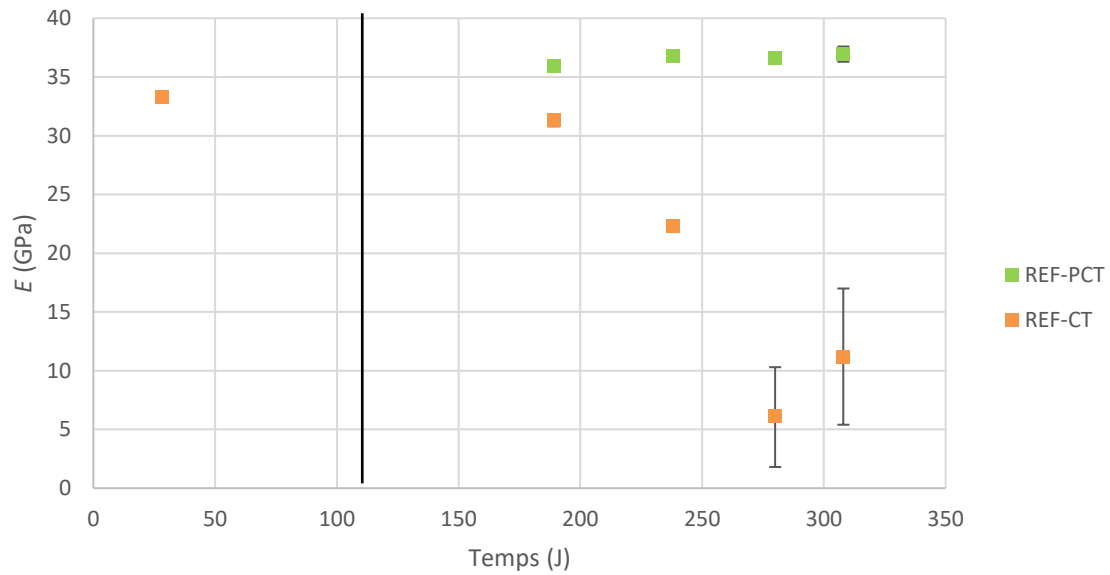


Figure 4.11 - Évolution du module d'Young en fonction du temps pour les éprouvettes de référence

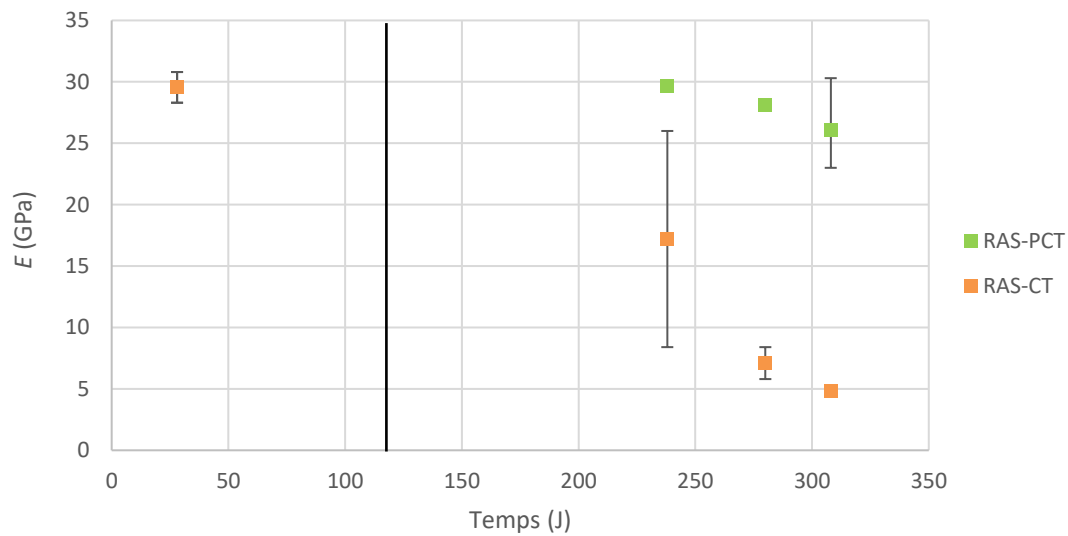


Figure 4.12 - Évolution du module d'Young en fonction du temps pour les éprouvettes RAS

Tableau 4.2 - Module d'Young des éprouvettes ESA à 28 jours

	ESA (GPa)
Éprouvette 1	34,8
Éprouvette 2	32,7
Moyenne	33,8

4.1.5 Résistance à la traction

Les deux graphiques (figures 4.13 et 4.14) suivants présentent l'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps pour chaque endommagement (RAS et REF). Le tableau 4.3 présente les résultats pour les éprouvettes ESA à 28 jours.

Dans le cas des éprouvettes RAS, il y a une légère augmentation des valeurs moyennes à 40 semaines par rapport à 34 semaines. Augmentation de 0,4 MPa pour les éprouvettes PCT, augmentation de 0,3 MPa pour les éprouvettes CT.

Pour les éprouvettes REF, on note une légère augmentation des valeurs moyennes à 40 semaines pour les deux catégories, PCT et CT (respectivement 0,7 MPa et 0,1 MPa). De même, la différence entre les deux catégories est notable.

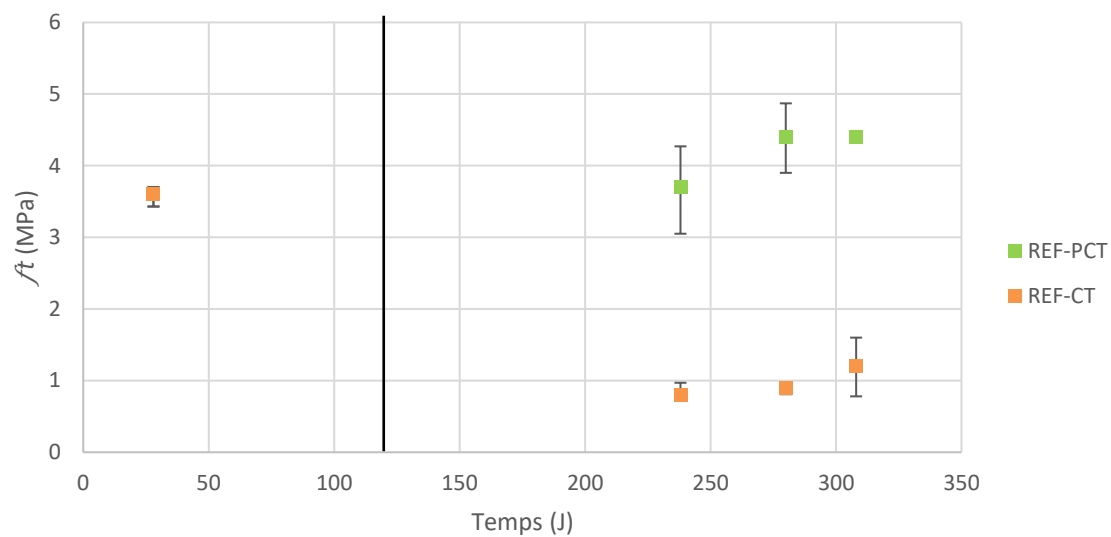


Figure 4.13 - Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps pour les éprouvettes de référence

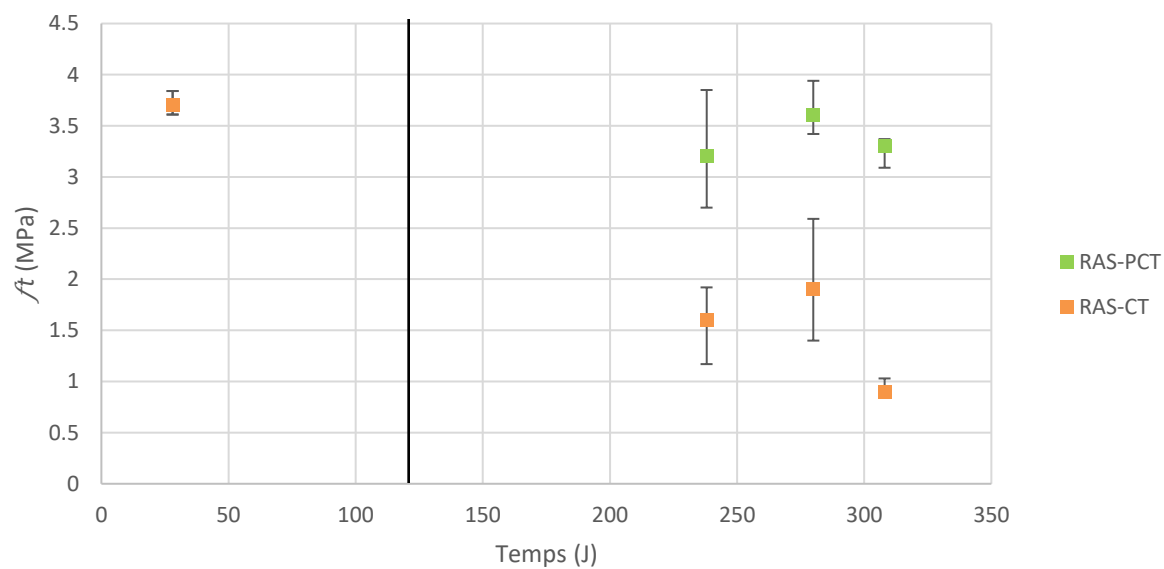


Figure 4.14 - Évolution de la résistance à la traction en fonction du temps pour les éprouvettes RAS

Tableau 4.3 - Résistance à la traction indirecte des éprouvettes ESA à 28 jours

	ESA (MPa)
Éprouvette 1	4,32
Éprouvette 2	3,80
Éprouvette 3	3,77
Moyenne	3,9

4.2 ESSAIS NON DESTRUCTIFS

4.2.1 UPV

- Référence (figure 4.15)

Les variations d'UPV pour les éprouvettes REF sont observées en deux périodes : préchoc thermique et post-choc thermique.

- Préchoc thermique

Avant 120 jours, il y a une augmentation de la vitesse de propagation des ondes de compression dans les éprouvettes. Avant 28 jours, l'augmentation est notable : passage de 4800 m/s en moyenne à 14 jours à 5000 m/s en moyenne à 28 jours. Au-delà de 28 jours, l'augmentation de la vitesse de propagation est moins importante : passage de 5000 m/s à 28 jours à 5050 m/s à 98 jours. La dispersion des valeurs est faible. Ces augmentations à jeune âge s'expliquent par la densification/rigidification de la matrice cimentaire.

- Post-choc thermique

Pour les éprouvettes PCT, la vitesse de propagation des ondes continue d'augmenter sur la même tendance qu'avant le choc thermique jusqu'à 220 jours, puis débute en tendance baissière. Les valeurs passent de 5050 m/s à 98 jours à 5150 m/s à 224 jours (leur maximum moyen). Pour

les éprouvettes CT, la vitesse de propagation diminue à la suite de l'application du choc thermique: passage d'une moyenne de 5064 m/s à 4964 m/s. Celle-ci est de plus en plus importante au cours du temps : moyenne finale de 3920 m/s soit une perte de 23% par rapport aux valeurs préchoc thermique.

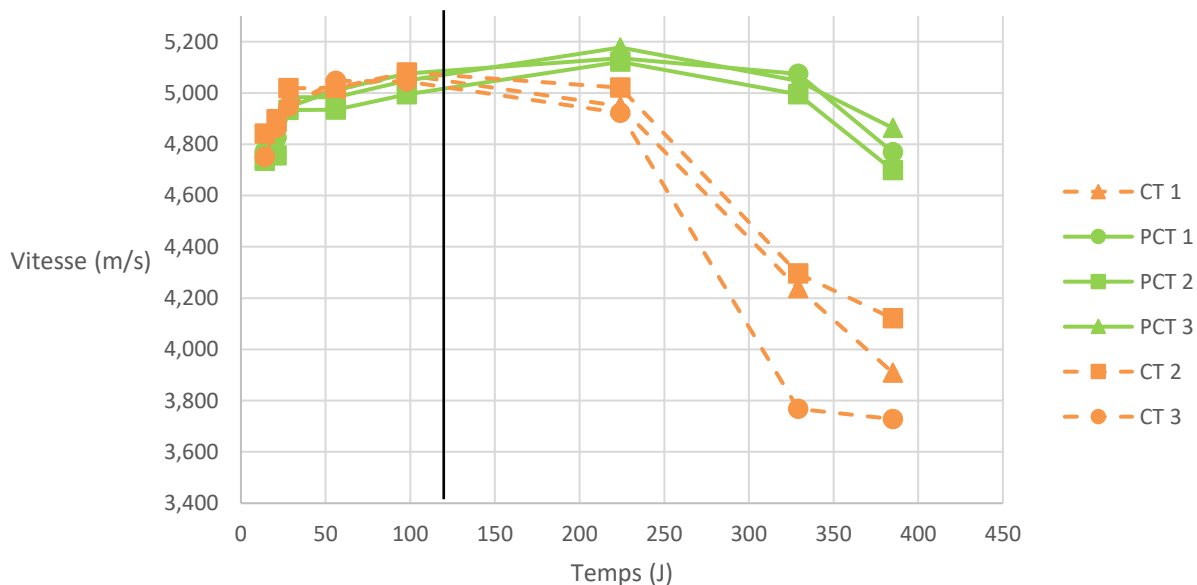


Figure 4.15 - Évolution de la vitesse de propagation des ondes de compression (UPV) des éprouvettes de référence

Pour ces éprouvettes PCT, la baisse de l'UPV après 220 jours et l'augmentation de l'allongement après 329 jours suggèrent qu'un endommagement a lieu dans le béton malgré le fait qu'elles n'aient pas subi de choc thermique.

- RAS (figure 4.16)

La vitesse de propagation des ondes de compression augmente après le gâchage : augmentation entre le 21^e (moyenne de 4424 m/s) et le 28^e jour (moyenne de 4756 m/s). À partir du 56^e jour, la vitesse moyenne des ondes des éprouvettes diminue : moyenne de 4756 m/s au 56^e jour puis

4667 m/s au 65^e jour. Par la suite, les vitesses sont constantes jusqu'à la réalisation du choc thermique à 120 jours.

Pour les éprouvettes PCT, la vitesse moyenne des ondes reste constante après la date du choc thermique, elles sont toujours comprises entre 4600 et 4800 m/s. Pour les éprouvettes CT, la vitesse des ondes diminue après l'application du choc thermique. En moyenne, la vitesse des ondes diminue de 5% après le choc thermique. Au-delà de 160 jours, la vitesse de propagation diminue pour les CT (sauf pour CT 2). Cette diminution est importante, les valeurs obtenues sont inférieures à celles en début d'essais (inférieures à 4200 m/s pour CT3 et inférieure à 3600 m/s pour CT 1).

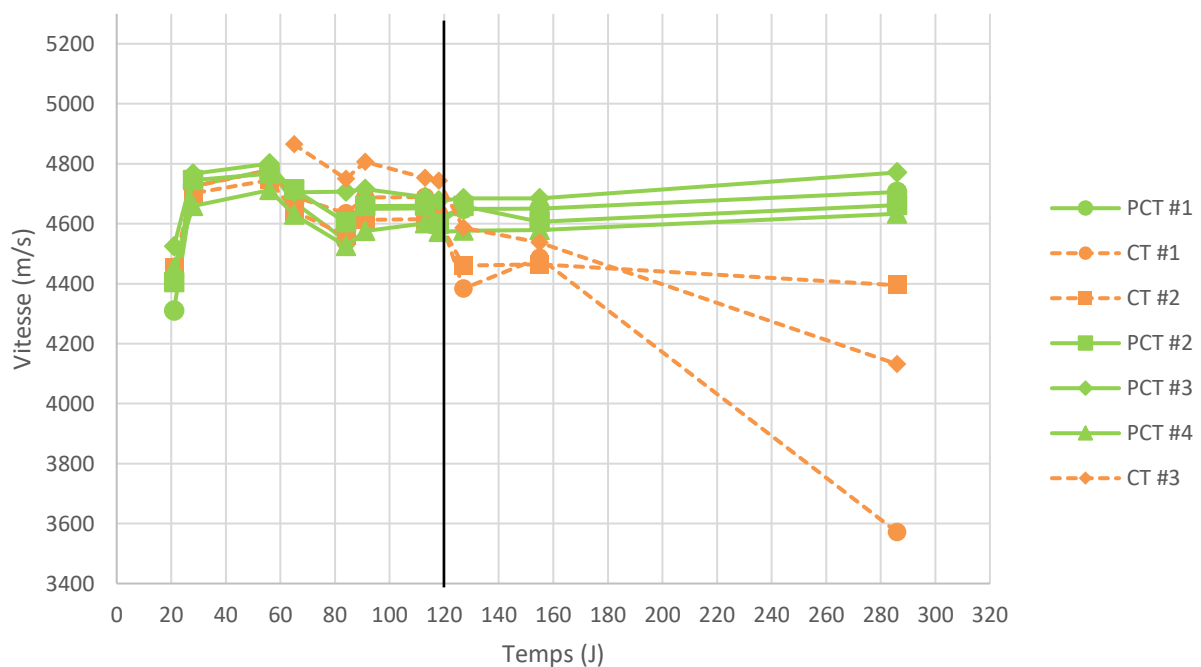


Figure 4.16 - Évolution de la vitesse de propagation des ondes de compression (UPV) des éprouvettes RAS

La baisse décrite à jeune âge montrerait le développement de la RAS dans le béton des éprouvettes et donc le début de la dégradation. En effet, le développement de la fissuration interne liée à la RAS diminue la qualité du matériau et diminue la vitesse de propagation des ondes de compression dans les éprouvettes. L'application du choc thermique fait baisser la

vitesse de propagation des ondes. Une distinction est notable entre les éprouvettes PCT et CT. Cette baisse étant plus importante au fur et à mesure. On observe une dispersion des valeurs au cours du temps. Pour les éprouvettes PCT, les vitesses sont inchangées au cours du temps.

- ESA (figure 4.17)

La vitesse de propagation des ondes de compression a une tendance à jeune âge similaire aux autres éprouvettes (figure 4.17). Avant 21 jours, cette tendance est haussière : passage de 4836 m/s en moyenne à 7 jours puis 4956 m/s à 21 jours. Par la suite, la dispersion des valeurs est importante, mais elles restent globalement constantes jusqu'à l'application du choc thermique à 120 jours. Cela suggère qu'aucun endommagement ne se développe dans le matériau.

À 126 jours, on note une baisse des variations de vitesse des ondes de compressions pour les éprouvettes CT suite à l'application du choc thermique : passage de 4989 m/s à 4750 m/s après le choc, soit une baisse de 5% des vitesses. Pour les éprouvettes PCT, les vitesses restent inchangées : leurs valeurs moyennes sont 4985 m/s.

L'augmentation de l'allongement mentionnée précédemment et la baisse de la vitesse des ondes pour les éprouvettes CT confirment la dégradation du béton de ces éprouvettes suite à l'application du choc.

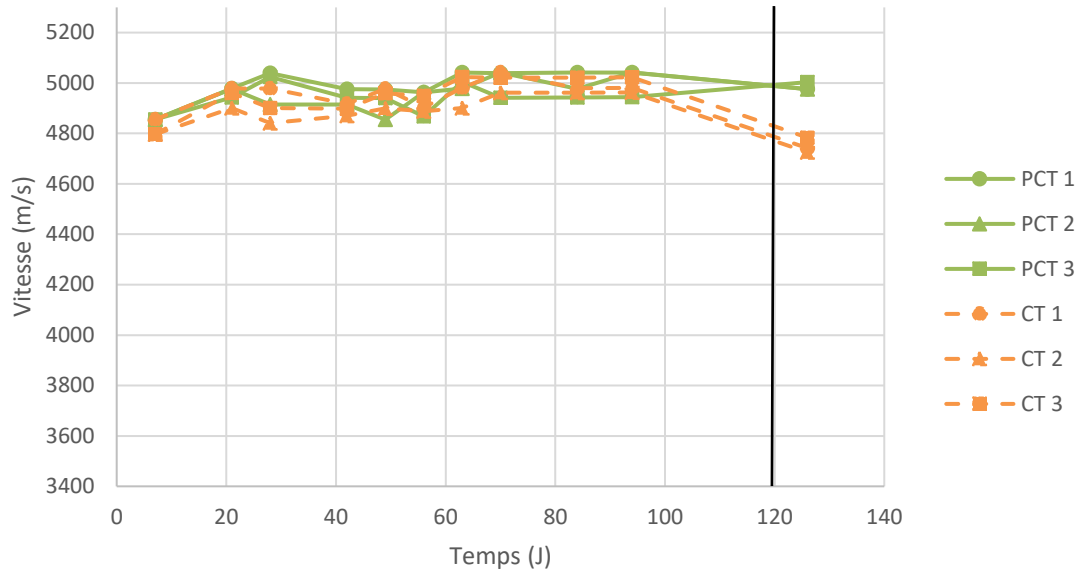


Figure 4.17 - Évolution de la vitesse de propagation des ondes de compression (UPV) des éprouvettes ESA

4.2.2 NIRAS

Deux types de résultats sont présentés pour les essais NIRAS : les courbes de fréquences et les courbes de détermination du paramètre α pour une seule éprouvette CT et une seule PCT à deux échéances. La première et la dernière échéance sont présentées dans cette section. Les résultats des échéances intermédiaires et des autres éprouvettes sont donnés en annexe (annexes 2, 4 et 6).

- Référence

Rappelons que pour les figures des évolutions de la fréquence en fonction de l'amplitude, chaque courbe d'un même essai correspond à une impulsion émise transversalement dans l'éprouvette suite à un coup de marteau appliqué à une intensité donnée. Cela permet d'observer les variations d'amplitudes en fonction de la fréquence. La fréquence où l'amplitude est maximale est définie comme la fréquence de résonance.

Pour l'éprouvette REF-PCT-2, la première échéance est 56 jours après le gâchage. La figure 4.18 montre un alignement des fréquences de résonance pour chaque impulsion émise dans le

matériau, et ce pour toutes les éprouvettes à la première échéance. La dernière échéance est 322 jours après le gâchage. Pour cette dernière (figure 4.19), l'éprouvette PCT-2 présente des fréquences de résonance similaires pour chaque impulsion émise dans le matériau. C'est le cas pour les autres éprouvettes PCT. À cette échéance, les courbes sont plus évasées. Comparativement à l'échéance initiale de 56 jours, la fréquence de résonance centrale augmente entre les deux dates.

Dans le cas des variations du paramètre α entre la première et la dernière échéance pour l'éprouvette PCT-2 (figure 4.20), il y a une diminution de la valeur de α entre les deux échéances : passage de 0,0025 à 0,0005.

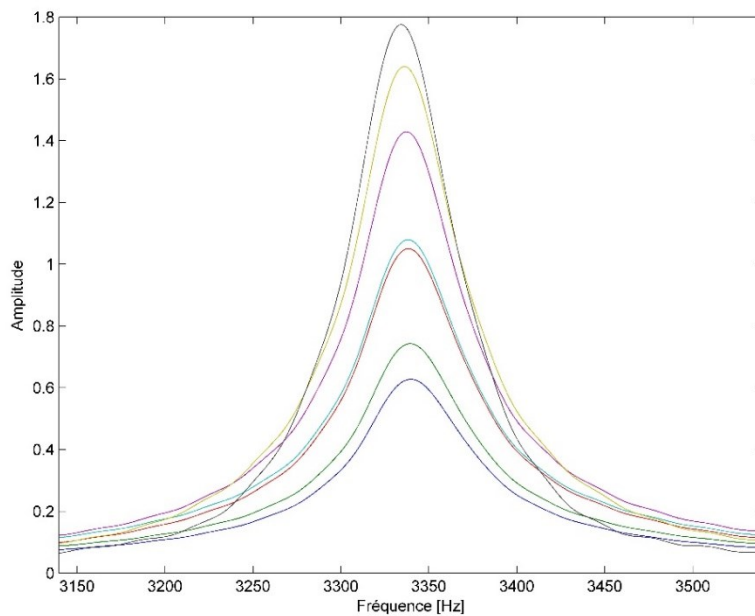


Figure 4.18 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 56 jours (NIRAS- REF-PCT2)

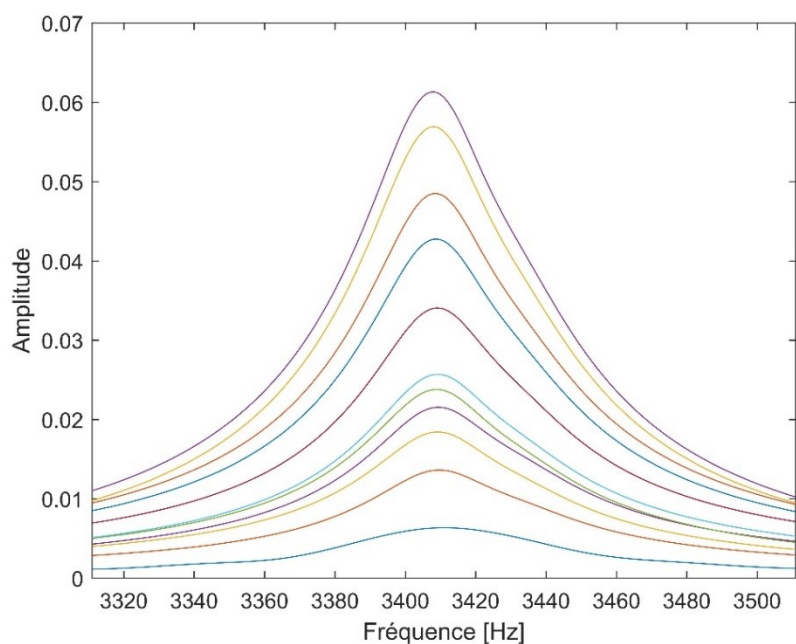


Figure 4.19 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 322 jours (NIRAS-REF-PCT2)

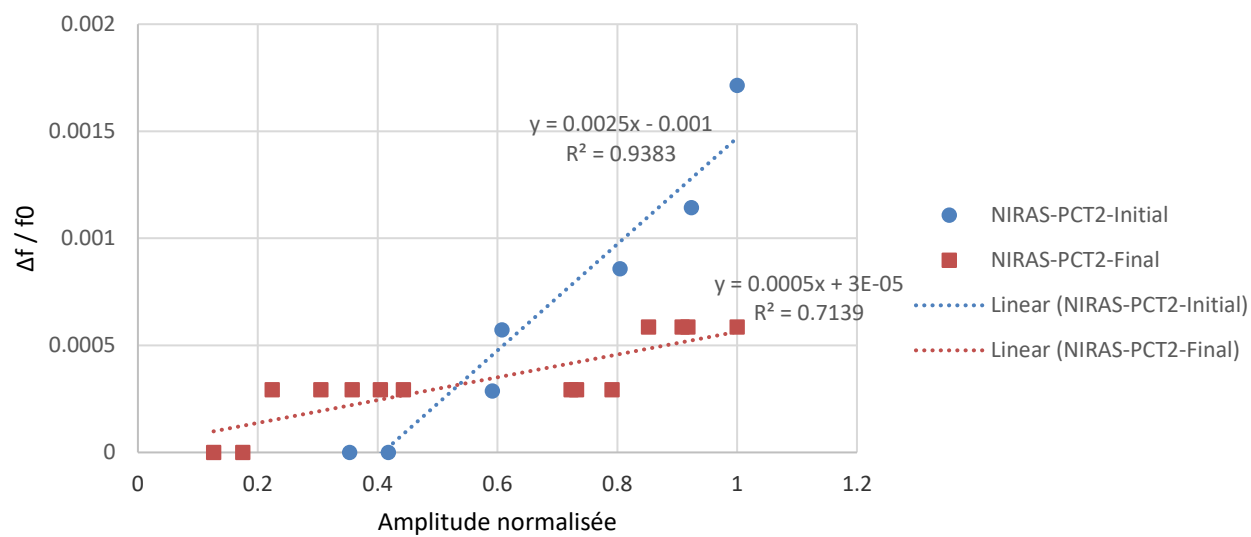


Figure 4.20 - Évolution du paramètre α entre 56 et 322 jours (NIRAS-REF-PCT2)

Dans le cas des éprouvettes CT, en augmentant l'amplitude des impulsions émises il y a une baisse de la fréquence de résonance naturelle dû à une perte de rigidité : passage de 3340 Hz à 2220 Hz dans le cas de REF-CT2 (figure 4.21 et 4.22). De plus, à 56 jours, les courbes obtenues sont symétriques contrairement à celles à 266 jours.

Pour les valeurs de α des éprouvettes CT (figure 4.23), il y a augmentation du paramètre entre la première et dernière échéance : passage de 0,0005 à 0,1233. On notera la qualité de la régression linéaire (facteur R^2 relativement bon pour ce dernier).

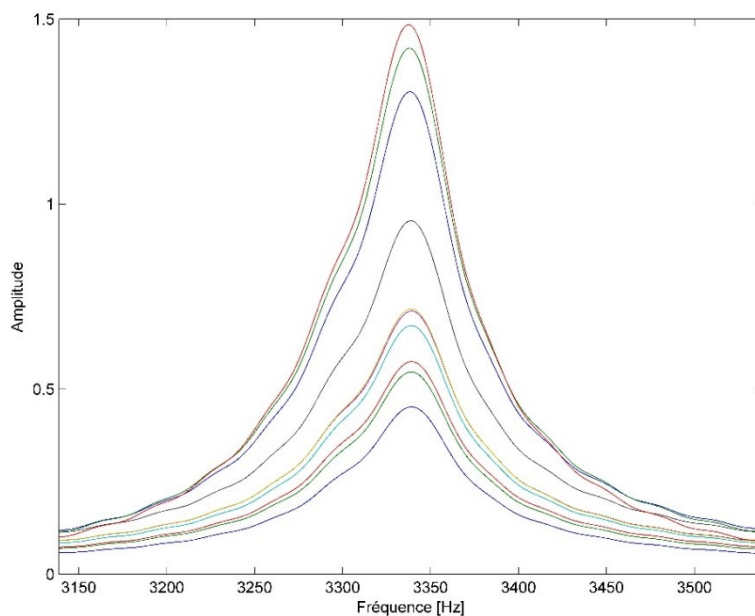


Figure 4.21 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 56 jours (NIRAS- REF-CT2)

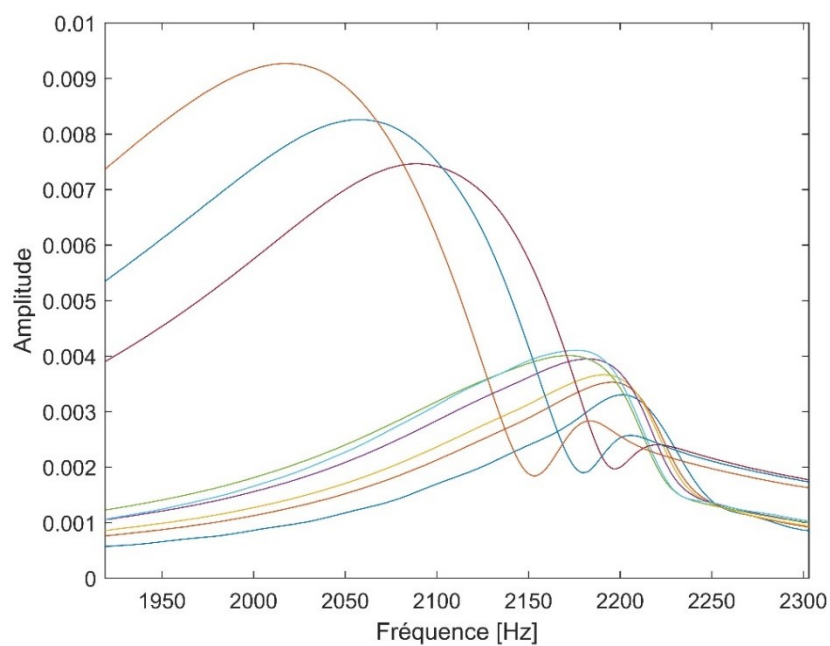


Figure 4.22 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 266 jours (NIRAS- REF-CT2)

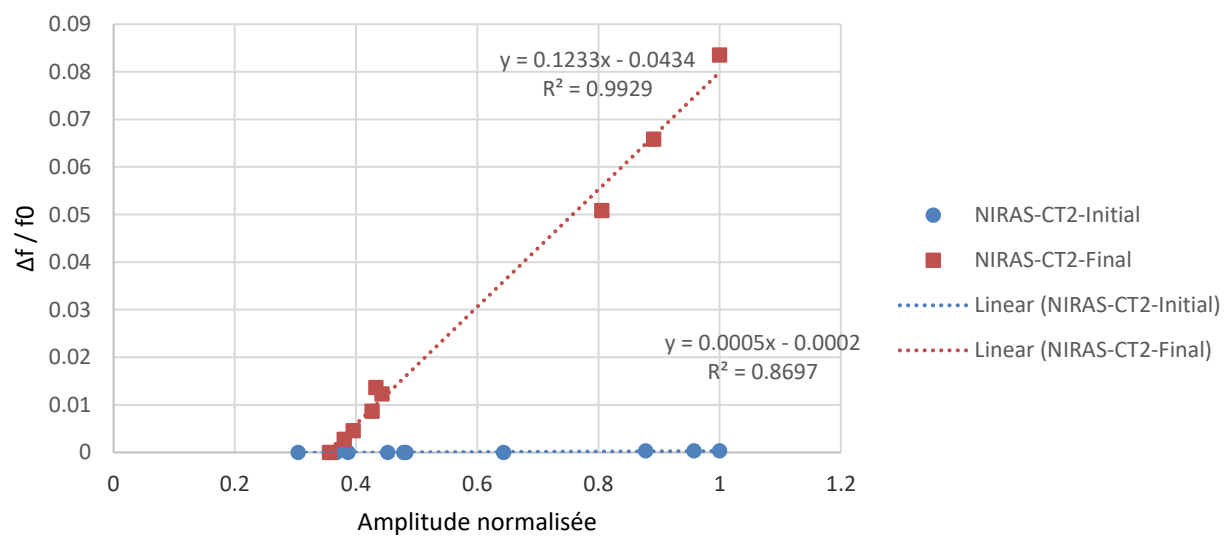


Figure 4.23 - Évolution du paramètre α entre 56 et 322 jours (NIRAS-REF-CT2)

Pour étudier les résultats NIRAS de manière globale, les moyennes des résultats sont présentées dans les tableaux 4.4 (variation de fréquence de résonance naturelle) et 4.5 (variation de α).

On observe pour toutes les éprouvettes une augmentation de la fréquence de résonance pendant la période préchoc thermique (tableau n°4.4). L'explication est que la matrice cimentaire continue son hydratation et il y a densification/rigidification de celle-ci. La fréquence de résonance des éprouvettes a donc une tendance haussière. Les graphiques des variations de fréquences montrent un alignement des fréquences de résonance, quelles que soient les sollicitations (figures 4.18 et 4.21). Cela signifie qu'il n'y a pas d'endommagement menant à une modification des propriétés élastiques du matériau lors de la propagation des ondes acoustiques. Par conséquent, les variations du paramètre α sont négligeables. Cela est valable pendant toute la période préchoc thermique.

Pour la période post-choc thermique, nous étudions l'influence du choc à court et long terme. L'analyse à court terme se fait en analysant les résultats obtenus à 112 jours et à 133 jours, soit 8 jours avant le choc thermique et 13 jours après.

Les résultats montrent une baisse de la fréquence de résonance naturelle uniquement pour les éprouvettes CT (tableau 4.4). Cette baisse est supérieure à 200 Hz en moyenne (6.5%) pour les ondes transversales. Les éprouvettes PCT ne présentent pas de variation; leur fréquence de résonance est similaire entre ces deux dates.

Dans le cas du paramètre α (tableau 4.5), il augmente pour 2 des 3 éprouvettes CT de 70% et 300%. Cependant, pour une des éprouvettes (CT3), il diminue de 18%. Dans le cas des éprouvettes PCT, il augmente aussi (en moyenne 44%, l'éprouvette PCT2 n'est pas prise en considération dans cette moyenne, car les résultats pré CT étaient inexploitable).

Suite à ces résultats, les variations de fréquence de résonance naturelle sont le paramètre permettant de constater le mieux l'effet du choc thermique. En effet, dans le cas des éprouvettes CT et PCT, le paramètre α augmente en moyenne du même ordre de grandeur entre les mêmes échéances : augmentation en moyenne de 44% pour les PCT et 117% pour les CT. Cela semble incohérent puisque les éprouvettes PCT n'ont subi aucun endommagement pour modifier leurs propriétés acoustiques non linéaires.

À long terme, les variations de fréquences de résonance des éprouvettes CT permettent de constater que le paramètre α est important compte tenu du décalage fréquentiel entre les sollicitations produites par les coups de marteau. L'augmentation moyenne est de 16200% (fois 163 en moyenne). Dans le cas des variations de la fréquence de résonance naturelle entre les deux dates, il y a une baisse moyenne de 47%. Dans le cas des éprouvettes PCT, les variations de la fréquence de résonance naturelle sont presque nulles. Les variations du paramètre α sont négligeables comparativement aux éprouvettes CT.

Les différences entre les deux types d'éprouvettes CT et PCT pour les résultats NIRAS sont considérables.

Tableau 4.4 - Variation des fréquences de résonances des éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 56j, Pre CT = 112j, Post CT = 133j et Finale = 322j).

Éprouvette	Période	Fréquence (Hz)	Variation (%)
PCT1	Initiale	3330	
	Pre CT	3370	1
	Post CT	3370	0
	Finale	3410	1
PCT2	Initiale	3340	
	Post CT	3390	1
	Finale	3420	2
PCT3	Initiale	3280	
	Pre CT	3330	2
	Post CT	3330	0
	Finale	3370	1
CT1	Initiale	3355	
	Pre CT	3395	1
	Post CT	3190	-6
	Finale	1700	-50
CT2	Initiale	3340	
	Pre CT	3380	1
	Post CT	3120	-8
	Finale	2200	-35
CT3	Initiale	3360	
	Pre CT	3415	2
	Post CT	3220	-6
	Finale	1460	-57

Tableau 4.5 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 56j, Pre CT = 112j, Post CT = 133j et Finale = 322j).

Éprouvette	Période	α	Variation (%)	R ²
PCT1	Initiale	0,0015		0,93
	Pre CT	0,0008	-47	0,86
	Post CT	0,001	25	0,89
	Finale	0,0006	74	0,81
PCT2	Initiale	0,0025		0,94
	Post CT	0,0006	-76	0,74
	Finale	0,0005	-17	0,71
PCT3	Initiale	0,0003		0,13
	Pre CT	0,0011	267	0,95
	Post CT	0,0018	64	0,95
	Finale	0,0003	-73	0,32
CT1	Initiale	0,0011		0,89
	Pre CT	0,001	-9	0,94
	Post CT	0,0017	70	0,95
	Finale	0,1805	17950	0,95
CT2	Initiale	0,0005		0,87
	Pre CT	0,0009	80	0,66
	Post CT	0,0036	300	0,99
	Finale	0,1233	13600	0,99
CT3	Initiale	0,001		0,87
	Pre CT	0,0011	10	0,95
	Post CT	0,0009	-18	0,41
	Finale	0,1788	16155	0,95

- RAS

Dans le cas des éprouvettes RAS, les courbes aux première et dernière échéances sont présentées aux figures 4.24, 4.25, 4.27 et 4.28 pour les éprouvettes PCT 1 et CT 2. Les autres éprouvettes sont présentées en annexe (annexe 4). La première échéance est 98 jours après le gâchage, la dernière à 324 jours.

Les fréquences de résonance de l'éprouvette PCT 1 à 98 jours sont similaires pour chaque impulsion. À 324 jours, il y a un décalage fréquentiel. Les variations des paramètres α pour l'éprouvette RAS-PCT 1 (figures 4.26 et 4.29) montrent ce décalage.

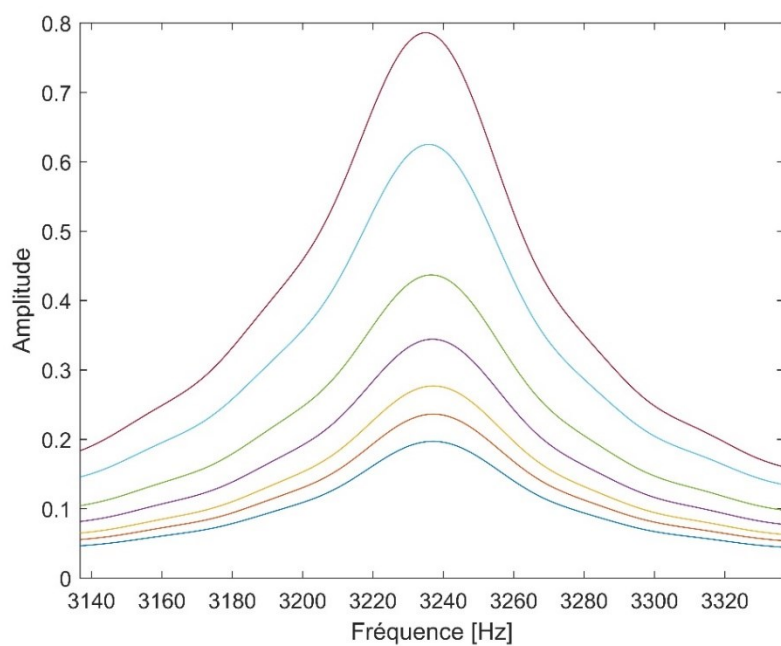


Figure 4.24 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 98 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-PCT1)

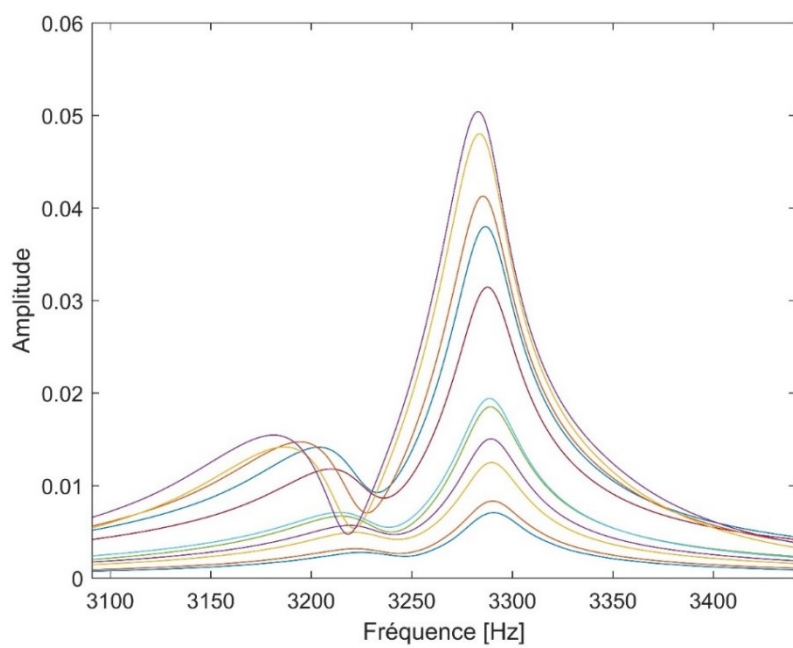


Figure 4.25 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 324 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-PCT1)

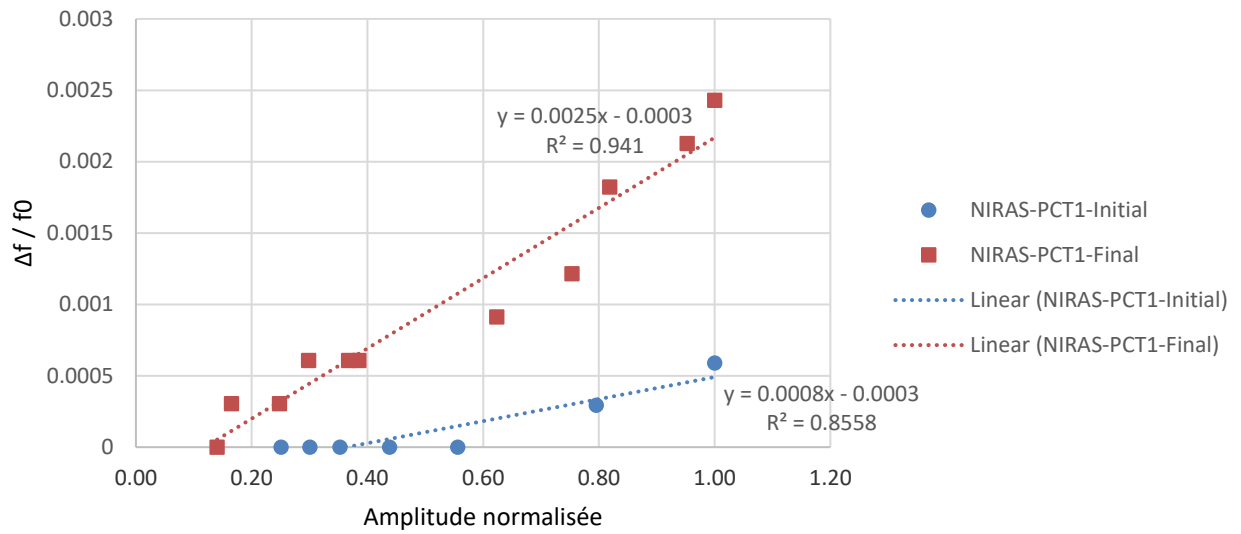


Figure 4.26 - Évolution du paramètre α entre 98 et 324 jours (NIRAS-RAS-PCT1)

Pour l'éprouvette RAS-CT 2 à la première échéance, les fréquences de résonance sont similaires, quelles que soient les amplitudes de sollicitations (figure 4.24). Cependant, à 324 jours, il y a un décalage fréquentiel entre les amplitudes les basses et les plus hautes (figure 4.25). Cela est validé pour toutes les éprouvettes CT.

Dans le cas des variations de α (figure 4.26), les valeurs augmentent entre 98 et 324 jours. Il y a généralement un rapport de 10 entre les deux dates. Ces variations sont plus importantes que les éprouvettes PCT.

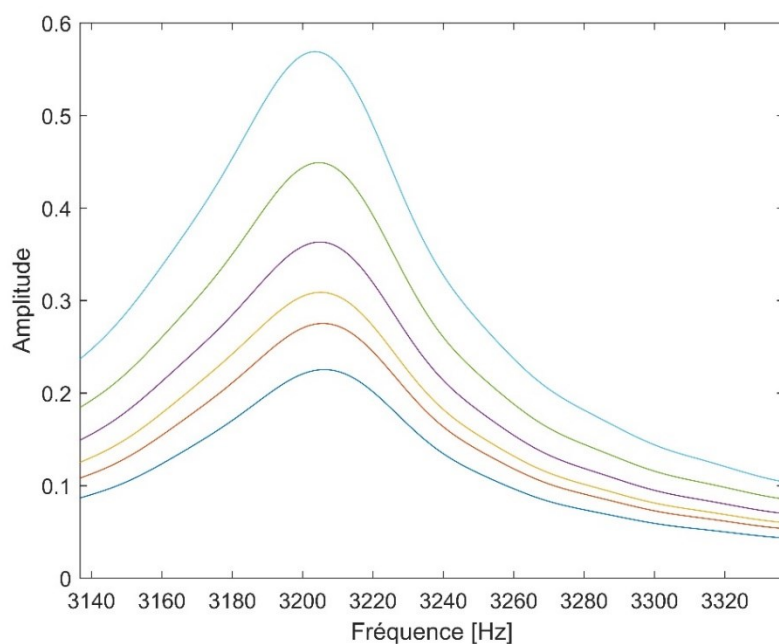


Figure 4.27 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 98 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-CT2)

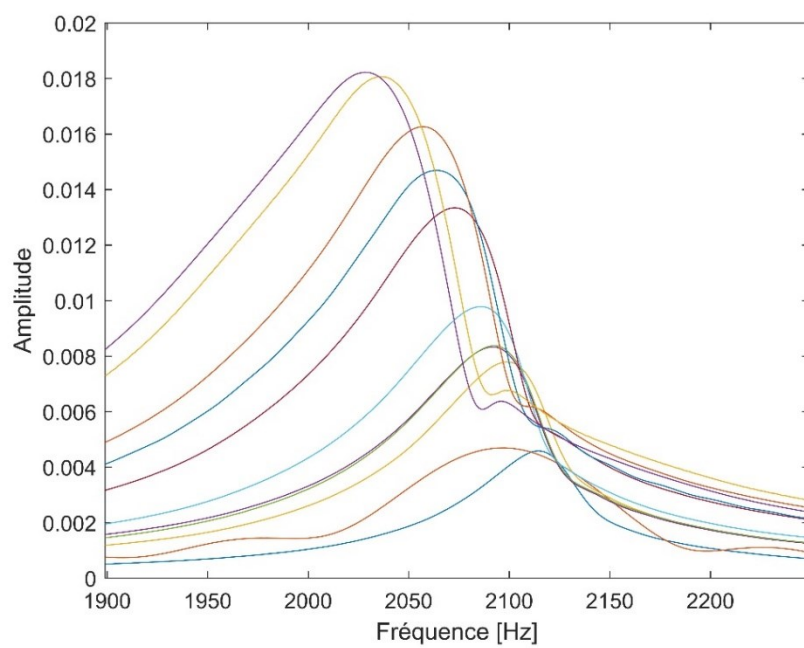


Figure 4.28 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 324 jours pour une éprouvette RAS (NIRAS-RAS-CT2)

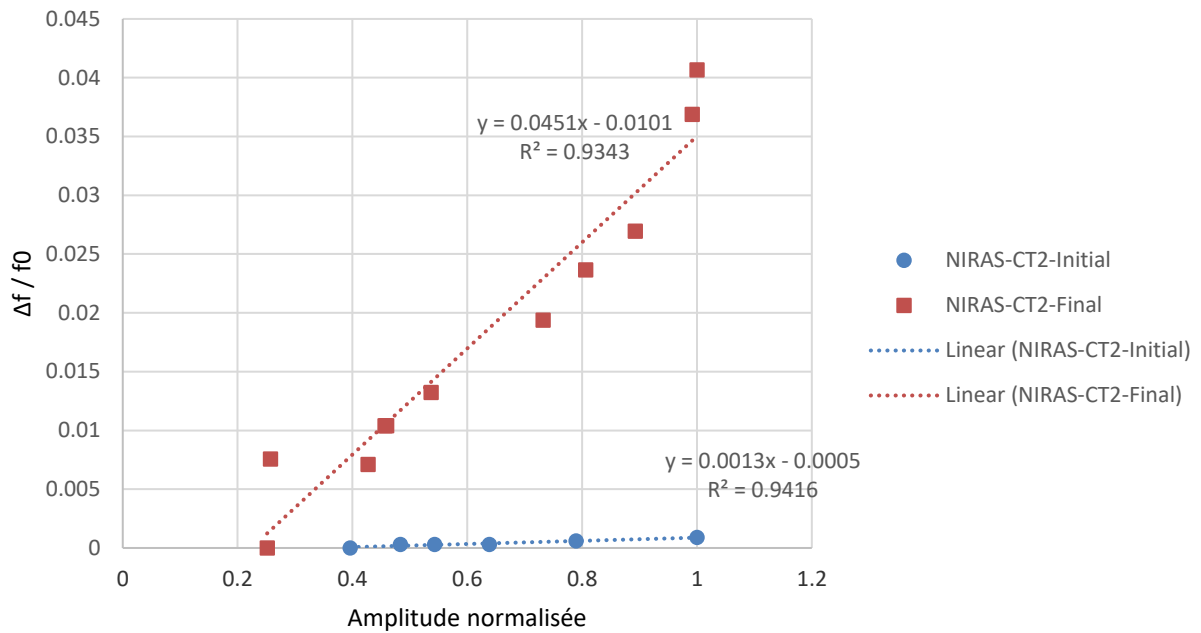


Figure 4.29 - Évolution du paramètre α entre 98 et 324 jours (NIRAS-RAS-CT2)

Les moyennes des résultats sont présentées dans les tableaux 4.6 (variation de fréquence de résonance) et 4.7 (variation de α).

Ces résultats globaux montrent qu'avant le choc thermique il n'y a aucune variation de la fréquence de résonance initiale pour toutes les éprouvettes (variation moyenne de 0%). Le maintien de cette fréquence s'explique par la durée entre l'échéance de la mesure dite initiale et le choc thermique. Cette durée est uniquement de 22 jours avant le choc. À ce même moment (22 jours avant l'application du choc thermique), l'allongement des éprouvettes est déjà important et est stable.

Pour le paramètre α , l'évolution pendant la période mono-endommagement est à la hausse. Les résultats montrent une augmentation moyenne de 398% des éprouvettes RAS entre les deux échéances. De plus, la valeur du R^2 moyen pour la détermination des valeurs de α est de 0,94 pour la totalité des essais. Cette valeur moyenne peut être considérée comme bonne. On en

déduit que la RAS a produit un micro-endommagement, non perceptible par la variation de fréquence naturelle ou bien par les mesures de vitesse ultrasonore.

À la suite du choc thermique, la fréquence de résonance présente une baisse de 7% pour les éprouvettes CT. À l'inverse, il n'y a pas de variation pour les PCT. Dans le cas des variations de α , les moyennes des valeurs pour les PCT et CT sont différenciables. Dans le premier cas, la moyenne de la variation avant et après le choc thermique est de -39%. Dans le second cas, la moyenne est de plus de +50%. Cependant, une de ces variations est négative (CT3) montrant que le choc thermique n'a pas eu d'influence sur ce paramètre. La comparaison de variations de α entre les PCT et CT permet d'identifier l'endommagement majeur suite à l'application du choc thermique. Cependant, sans comparer ces résultats aux autres paramètres mesurés cela n'aurait pas été possible. De plus, les valeurs des R^2 associées aux courbes de tendance de α sont élevées, soit 0,94 en moyenne.

À long terme, les fréquences de résonances initiales des éprouvettes CT baissent par rapport aux valeurs post-choc thermique. La moyenne de cette baisse est de 36%. C'est-à-dire que la dégradation due à la RAS a continué après le choc thermique affectant les fréquences de résonances initiales. Pour les éprouvettes PCT, les fréquences de résonance présentent une augmentation de 1% entre les valeurs post-choc thermique et les finales.

Dans le cas des CT, le paramètre α augmente en moyenne de 910% entre les valeurs post-choc thermique et les dernières valeurs mesurées, soit 324 jours après le gâchage. Il faut mentionner que la dispersion des variations est importante : les variations composant cette moyenne vont de 173% à 1772%. Pour les éprouvettes PCT, le paramètre α diminue de 21% en moyenne entre les valeurs post-choc thermique et les finales. Cette baisse montrerait un ralentissement du développement de la RAS dans le béton pour ces éprouvettes. De plus, bonnes valeurs de R^2 , donc résultats exploitables.

Tableau 4.6 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 98j, Pre CT = 119j, Post CT = 126j et Finale = 324j).

Éprouvette	Période	Fréquence (Hz)	Variation (%)
PCT 1	Initiale	3235	
	Pre CT	3250	0
	Post CT	3250	0
	Finale	3290	1
PCT 2	Initiale	3190	
	Pre CT	3190	0
	Post CT	3190	0
	Finale	3210	1
PCT 3	Initiale	3190	
	Pre CT	3230	1
	Post CT	3225	0
	Finale	3270	1
CT 1	Initiale	3215	
	Pre CT	3240	1
	Post CT	3020	-7
	Finale	2050	-37
CT 2	Initiale	3210	
	Pre CT	3150	-2
	Post CT	2990	-5
	Finale	2140	-32
CT 3	Initiale	3110	
	Pre CT	3040	-2
	Post CT	2750	-10
	Finale	1810	-40

Tableau 4.7 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 98j, Pre CT = 119j, Post CT = 126j et Finale = 324j).

Éprouvette	Période	α	Variation (%)	R ²
PCT 1	Initial	0,0008		0,86
	Pre CT	0,0023	188	0,99
	Post CT	0,0024	4	1.00
	Finale	0,0025	9	0,94
PCT 2	Initial	0,0021		0,96
	Pre CT	0,0151	619	0,88
	Post CT	0,0068	-55	0,94
	Finale	0,0124	-18	0,96
PCT 3	Initial	0,0033		0,99
	Pre CT	0,0142	330	0,92
	Post CT	0,0047	-67	0,99
	Finale	0,0066	-54	0,98
CT 1	Initial	0,0024		0,97
	Pre CT	0,0071	196	0,87
	Post CT	0,0101	42	0,98
	Finale	0,1329	1772	0,88
CT 2	Initial	0,0013		0,94
	Pre CT	0,0051	292	0,89
	Post CT	0,0113	122	0,96
	Finale	0,0451	784	0,93
CT 3	Initial	0,0038		0,99
	Pre CT	0,0327	761	0,79
	Post CT	0,0294	-10	0,96
	Finale	0,0893	173	0,94

- ESA

Dans le cas des éprouvettes ESA, les résultats NIRAS sont présentés avec les éprouvettes CT1 et PCT3 à 28 jours et 127 jours, soit la première et la dernière mesure. Pour le premier cas (figure 4.30) on observe un décalage fréquentiel entre la première amplitude de sollicitation et la dernière : diminution de 3270 Hz à 3265 Hz. Comparativement, les variations de fréquence de résonance pour la dernière échéance sont similaires, quelle que soit l'amplitude de sollicitation. Ces remarques sont traduites dans les variations de α (figure 4.32). Le paramètre est plus important à la première échéance qu'aux deux autres : à 119 et 127 jours où ils sont similaires.

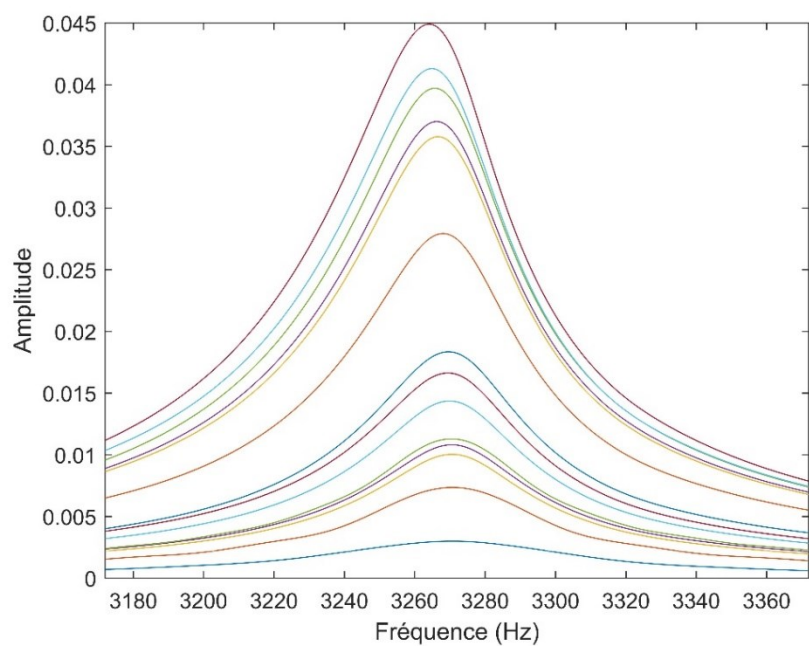


Figure 4.30 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 28 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-PCT3)

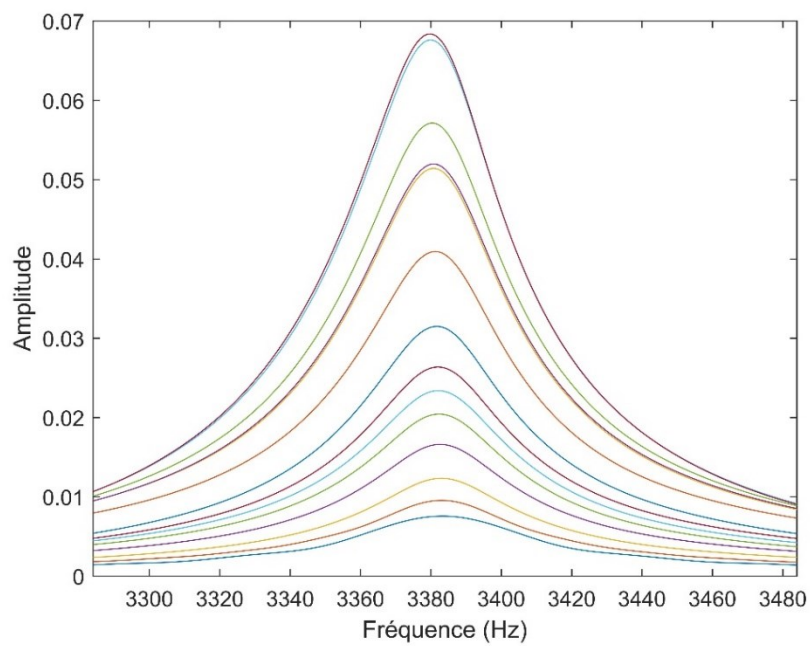


Figure 4.31 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-PCT3)

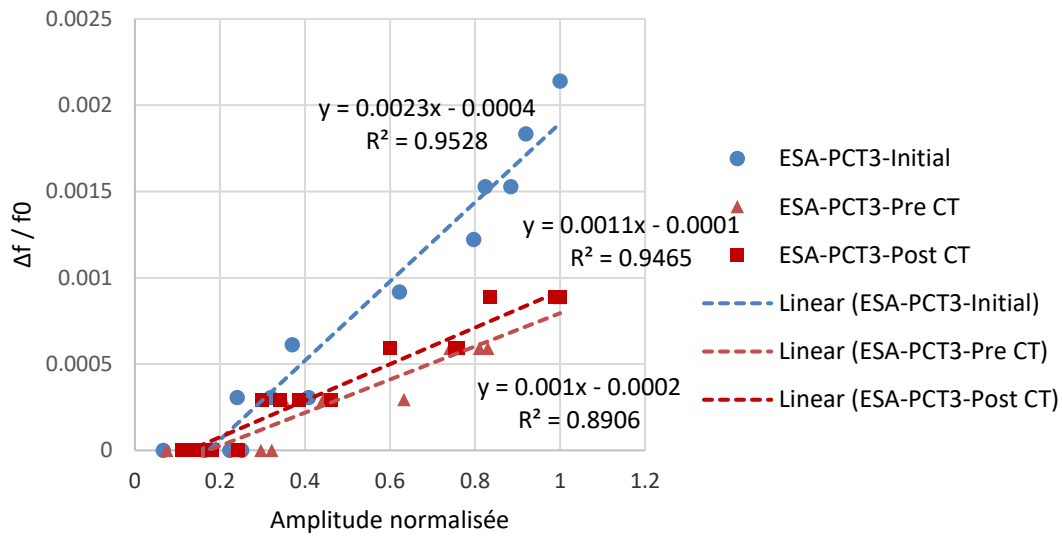


Figure 4.32 - Évolution du paramètre α à 28, 119 et 127 jours (ESA-PCT3)

Dans le cas des éprouvettes CT, les résultats de l'éprouvette CT 1 sont présentés aux figures 4.33 et 4.34. L'observation faite précédemment pour l'éprouvette PCT 3 à 28 jours est valide pour l'éprouvette CT 1 à la même échéance. Il y a un décalage fréquentiel vers les basses fréquences entre la première et la dernière impulsion générée : diminution de 3270 Hz à 3265 Hz (figure 4.33). À 127 jours (figure 4.34), la fréquence de résonance initiale est plus basse qu'à 28 jours : elle est de 3145 Hz. Il y a un décalage fréquentiel lors de l'augmentation des impulsions faisant passer la fréquence de résonance de 3145 Hz à 3135 Hz.

Les variations de α traduisent ces remarques (figure 4.35) : α est plus élevé à la dernière échéance (0,0040) qu'à la première (0,0026).

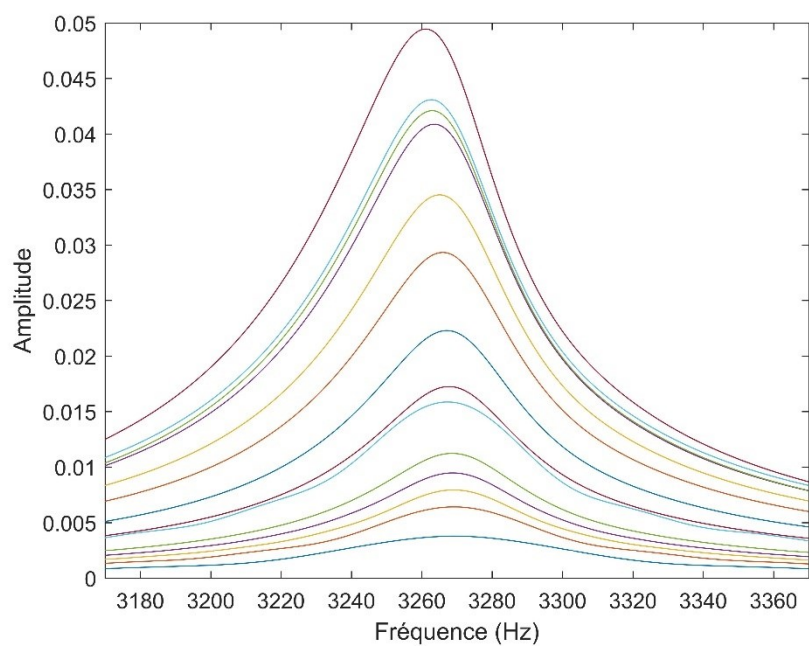


Figure 4.33 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 28 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-CT1)

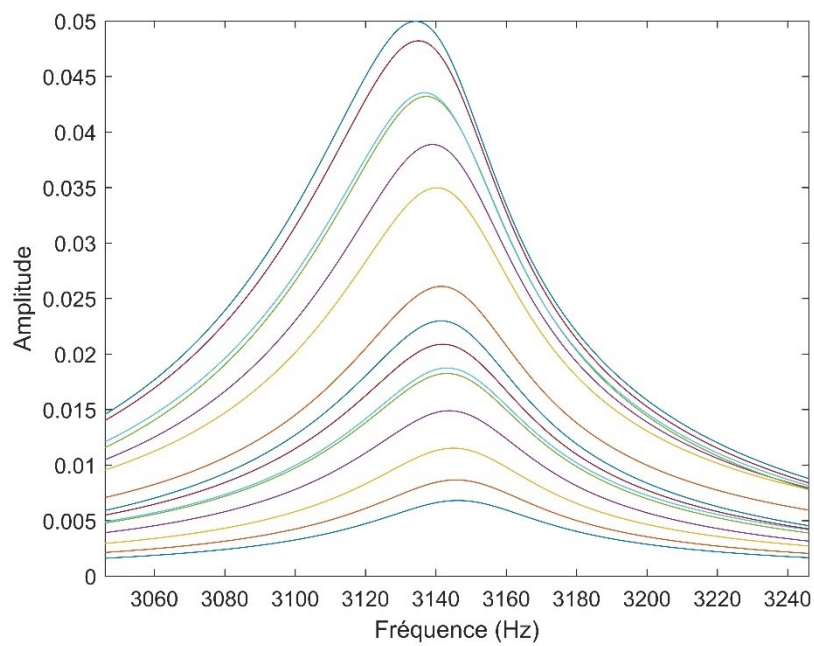


Figure 4.34 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NIRAS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NIRAS-ESA-CT1)

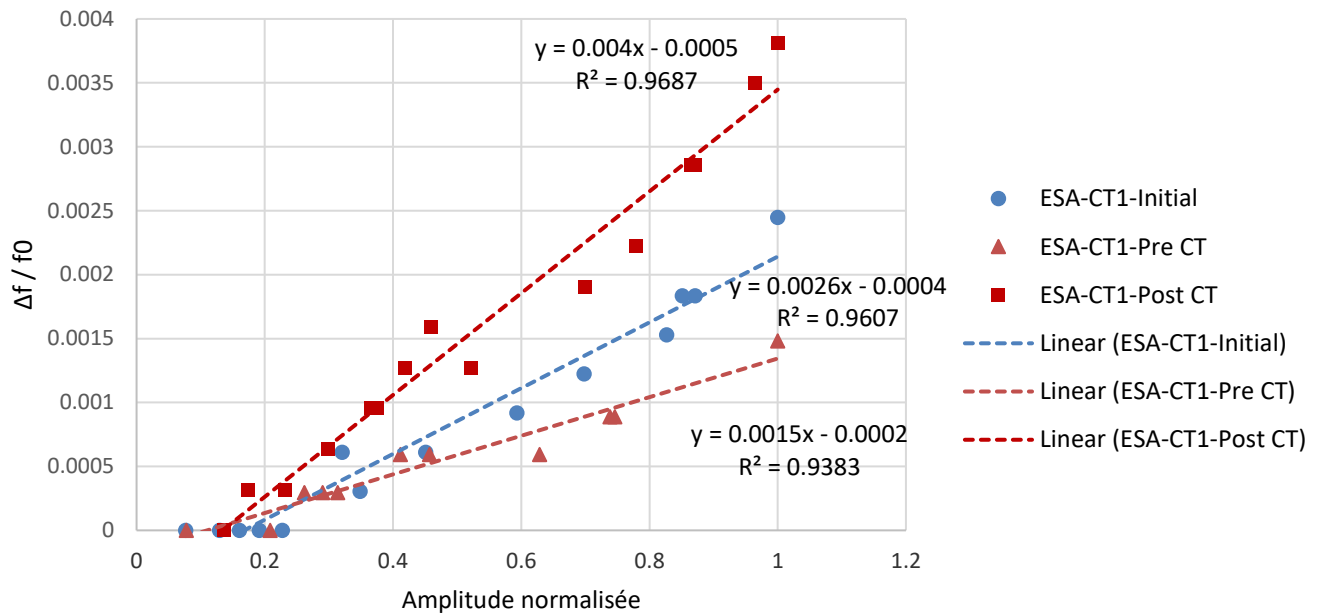


Figure 4.35 - Évolution du paramètre α à 28, 119 et 127 jours (ESA-CT1)

Les résultats globaux des variations des fréquences de résonance initiale (tableau 4.8) montrent que la fréquence de résonance naturelle augmente à jeune âge jusqu'à l'application du choc. Il y a une augmentation moyenne de 3%. Les résultats cohérents comparativement aux précédents (masse et UPV) qui sont expliqués par l'hydratation du ciment et par conséquent le durcissement de la pâte. Dans le cas du paramètre α (tableau 4.9), de 0 à 120 jours, il y a une baisse moyenne de 34% parmi les éprouvettes ESA. Cette baisse aurait une signification allant dans le même sens que précédemment : la non-linéarité du béton s'atténuerait par l'hydratation du ciment à jeune âge.

À la suite de l'application du choc thermique, la fréquence de résonance initiale des éprouvettes CT diminue en moyenne de 6%. Celle des PCT ne varie pas. Les variations du paramètre α sont cohérentes. En effet, l'application du choc thermique fait augmenter de 172% en moyenne le paramètre pour les éprouvettes CT. À l'inverse, il diminue de 3% en moyenne pour les éprouvettes PCT.

Tableau 4.8 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 28j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).

Éprouvette	Période	Fréquence (Hz)	Variation (%)
PCT 1	Initiale	3227	
	Pre CT	3343	4
	Post CT	3341	0
PCT 2	Initiale	3293	
	Pre CT	3401	3
	Post CT	3402	0
PCT 3	Initiale	3272	
	Pre CT	3383	3
	Post CT	3384	0
CT 1	Initiale	3270	
	Pre CT	3377	3
	Post CT	3147	-7
CT 2	Initiale	3269	
	Pre CT	3369	3
	Post CT	3190	-5
CT 3	Initiale	3216	
	Pre CT	3331	4
	Post CT	3162	-5

Tableau 4.9 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NIRAS (Initiale = 28j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).

Éprouvette	Période	α	Variation (%)	R ²
PCT 1	Initiale	0,0028		0,96
	Pre CT	0,0025	-11	0,90
	Post CT	0,0018	-28	0,94
PCT 2	Initiale	0,0029		0,86
	Pre CT	0,0022	-24	0,97
	Post CT	0,0024	9	0,98
PCT 3	Initiale	0,0023		0,95
	Pre CT	0,001	-57	0,89
	Post CT	0,0011	10	0,95
CT 1	Initiale	0,0026		0,96
	Pre CT	0,0015	-42	0,94
	Post CT	0,004	167	0,97
CT 2	Initiale	0,0021		0,97
	Pre CT	0,0021	0	0,93
	Post CT	0,0031	48	0,96
CT 3	Initiale	0,0038		0,98
	Pre CT	0,0012	-68	0,92
	Post CT	0,0048	300	0,98

4.2.3 NRUS

Les résultats des essais NRUS sont classés selon les endommagements. Trois graphiques sont présentés, deux graphiques de la variation de l'amplitude en fonction de la fréquence à la première et dernière échéance. Un deuxième de la variation de $\Delta f / f_0$ en fonction de l'amplitude pour déterminer le coefficient α .

Dans le cas des deux premiers graphiques, chaque courbe correspond à une impulsion mécanique à une fréquence précise. Les fréquences vont de 100 kHz à 800 kHz avec un pas de 50 kHz.

Les résultats présentés ci-dessous sont pour une éprouvette CT et une autre PCT pour chaque endommagement. Le reste des éprouvettes sont présentées en annexe (annexes 3, 5 et 7).

- Référence

L'évolution des fréquences de résonances de l'éprouvette PCT 1 (figure 4.36 et 4.37) montre un alignement des fréquences. C'est le cas aux deux échéances ci-dessous : 64 et 237 jours. Cependant, il y a une augmentation de la fréquence de résonance initiale (pour une fréquence de 100 Hz) : 9840 Hz à 10000 Hz. Les valeurs de α aux deux échéances (figure 4.38) sont négatives et leurs coefficients R^2 est faible voire nul. Les valeurs de α et ces variations ne sont donc pas exploitables.

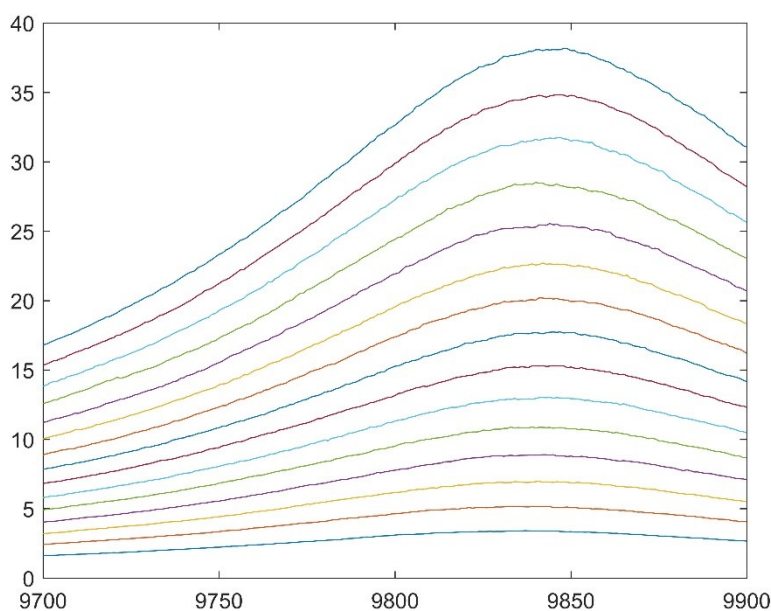


Figure 4.36 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 64 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-PCT1)

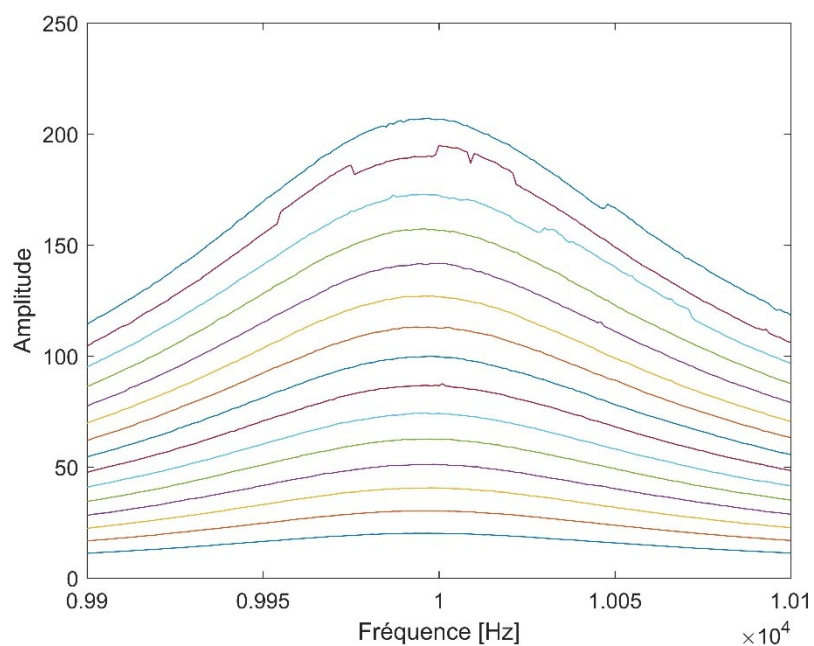


Figure 4.37 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 237 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-PCT1)

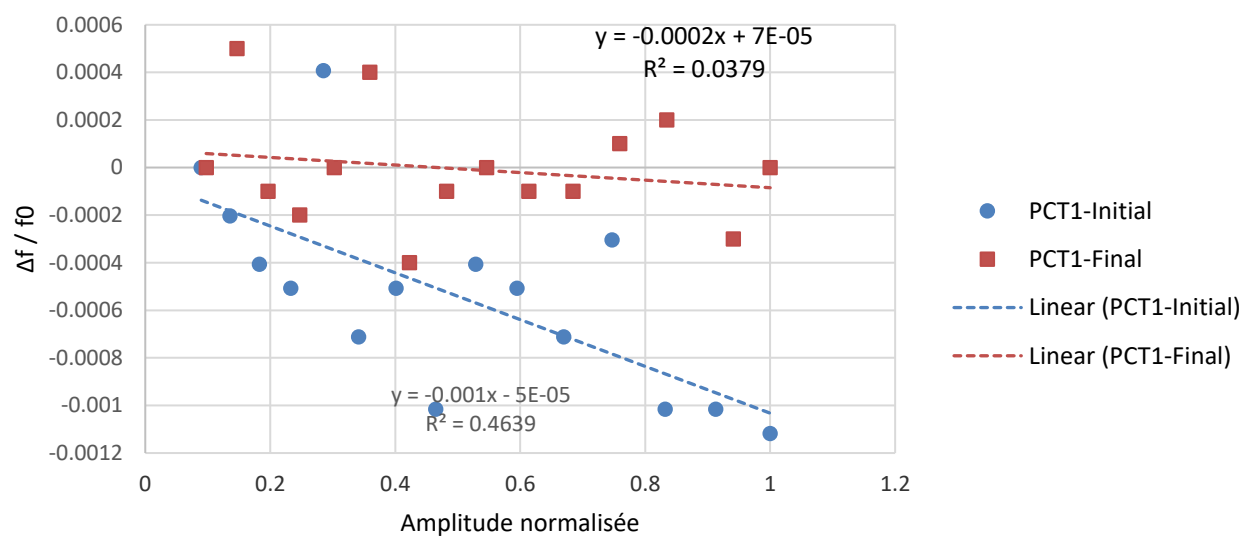


Figure 4.38 - Évolution du paramètre α à 64 et 237 jours (REF-PCT1)

Les figures 4.39 et 4.40 présentent les résultats pour l'éprouvette REF-CT1. Les mêmes remarques que pour l'éprouvette PCT peuvent être faites: alignement des fréquences de résonance pour les deux échéances malgré l'application d'un choc thermique à 120 jours. Cependant, la fréquence de résonance initiale a baissé entre les deux échéances : passage de 9840 Hz à 9510 Hz. Pour les valeurs de α (figure 4.41), elles sont faibles et négative à 64 jours (échéance initiale). Leurs R^2 sont très faibles, montrant des valeurs incohérentes, donc inexploitable.

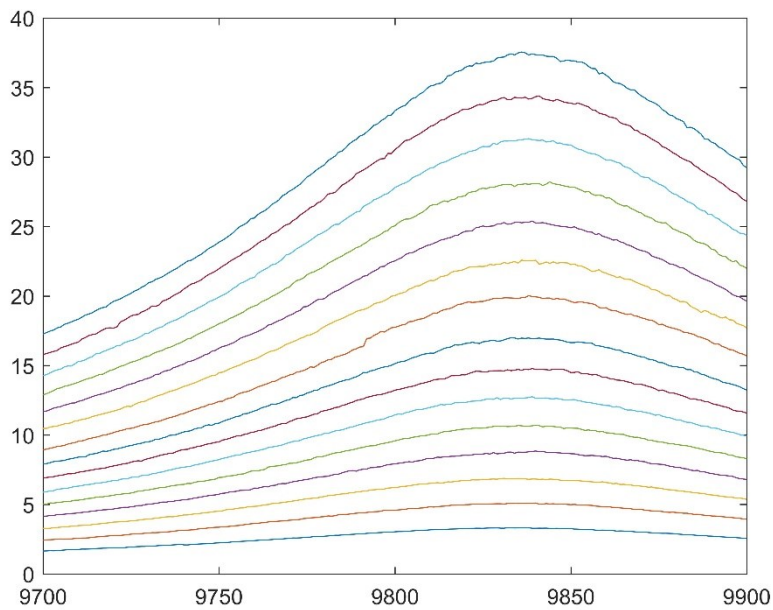


Figure 4.39 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 64 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-CT1)

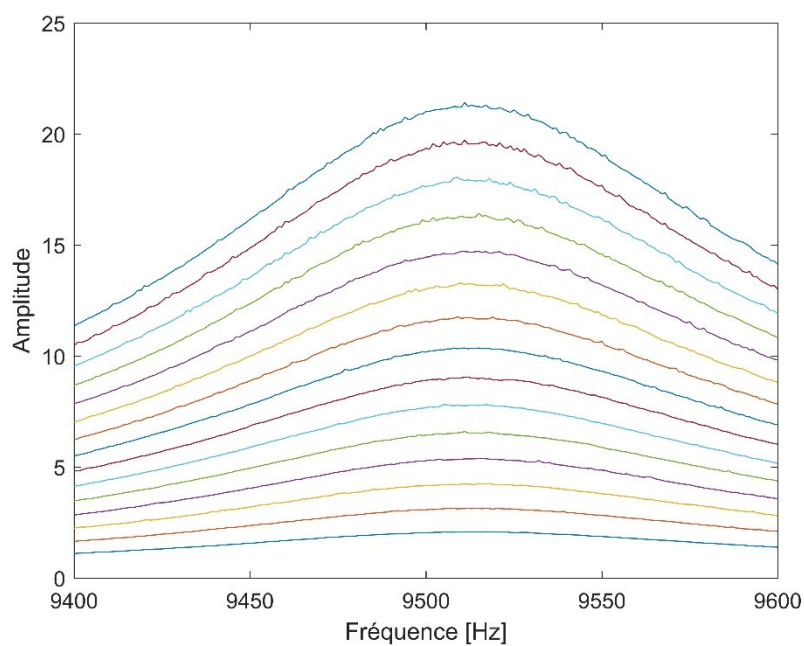


Figure 4.40 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 237 jours pour une éprouvette REF (NRUS-REF-CT1)

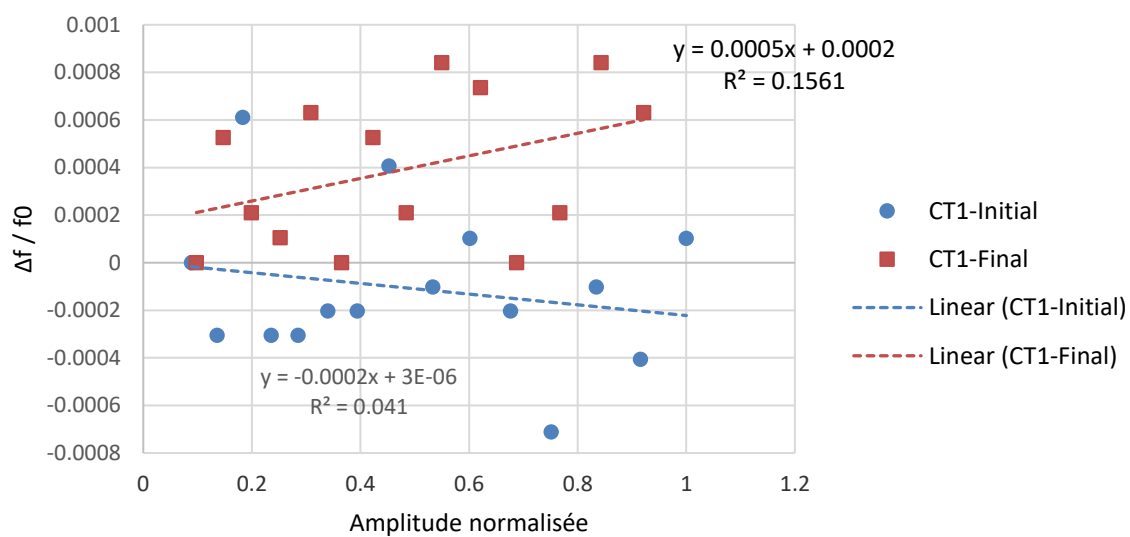


Figure 4.41 - Évolution du paramètre α à 64 et 237 jours (REF-CT1)

Dans les résultats mentionnés précédemment, il n'y a pas de variations de la fréquence de résonance lors de l'augmentation des sollicitations, quelles que soient les éprouvettes. Les variations du paramètre α sont donc négligeables sur la période étudiée. Cependant, il y a un décalage de la fréquence de résonance naturelle au cours du temps, soit une augmentation d'au moins 50 Hz pour toutes les éprouvettes. Ce comportement est similaire aux résultats NIRAS. Comparativement aux figures des résultats NIRAS, on remarque que les courbes sont plus évasées pour la même distance fréquentielle en abscisse (200 Hz). Ces différents éléments suggèrent qu'il n'y aurait pas d'endommagement en cours de développement.

Les résultats post-choc thermique sont étudiés à court et long terme. À la suite du choc thermique la fréquence de résonance naturelle des éprouvettes CT diminue en moyenne de 5% par rapport à leur fréquence de résonance préchoc thermique (tableau 4.10), à la différence des éprouvettes PCT où la fréquence centrale est inchangée.

Dans le cas du paramètre α (tableau 4.11), les variations ne sont pas précises, car les valeurs R^2 des courbes de tendances sont faibles : valeur moyenne de 0,3.

La raison de la faible qualité de ces résultats pourrait s'expliquer par deux éléments : 1) des défauts provenant de l'acquisition acoustique, 2) les propriétés du béton des éprouvettes affectant les résultats. Les défauts possibles liés à l'acquisition des signaux sont l'effet du couplant entre l'éprouvette et l'émetteur, l'émission des ondes d'amplitude trop faible ne permettant pas de solliciter les paramètres non linéaires du matériau. En effet, si l'épaisseur du couplant est trop importante entre l'émetteur et l'éprouvette, alors l'émission des ondes est perturbée. Les résultats prendront en considération le couplant en plus de l'éprouvette. Les caractéristiques des éprouvettes en béton affectent la qualité des résultats lors des essais d'acoustiques non linéaires. L'humidité relative des éprouvettes est un exemple [6].

Ces résultats nous ont amenés à réaliser des essais complémentaires afin de connaître d'en connaître la cause. Les détails de ces essais sont décrits dans le chapitre 5 : discussions.

À long terme, les variations de la fréquence de résonance naturelle sont « cohérentes » (tableau 4.10). Il y a une baisse des fréquences de résonance pour les échantillons CT uniquement, soit

des pertes entre 15 et 30% par rapport à la fréquence de résonance préchoc thermique. Dans le cas des éprouvettes PCT, il y a augmentation des valeurs de moins de 1% en moyenne.

Dans le cas du paramètre α (tableau 4.11), les valeurs des R^2 des courbes de tendances sont faibles. Les variations ne sont donc pas exploitables. Une discussion est faite sur ces résultats inexploitable dans la partie 3 de ce chapitre. L'observation faite dans la partie 1 concernant les courbes NRUS est aussi valable pendant la période post-choc thermique.

Dans cette configuration (sortie des éprouvettes des conditions de stockage 24 heures avant les essais), la méthode NRUS ne permet pas de suivre l'endommagement en développement des éprouvettes. L'endommagement sera évalué par microscopie optique (résultats obtenus avec le DRI à la figure 4.56) et par microscopie électronique (figure 4.54).

Tableau 4.10 - Variation des fréquences de résonance pour les éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 64j, Pre CT = 105j, Post CT = 126j et Finale = 336j).

Éprouvette	Période	Fréquence (Hz)	Variation (%)
PCT1	Initiale	9837	
	Pre CT	9910	1
	Post CT	9850	-1
	Finale	10025	1
PCT2	Initiale	9706	
	Pre CT	9840	1
	Post CT	9790	-1
	Finale	9900	1
X#PCT3	Initiale	9586	
	Pre CT	9800	2
	Post CT	9800	0
	Finale	9825	0
CT1	Initiale	9837	
	Pre CT	9900	1
	Post CT	9375	-5
	Finale	7000	-29
CT2	Initiale	9785	
	Pre CT	9800	0
	Post CT	9380	-4
	Finale	8100	-17
CT3	Initiale	9765	
	Pre CT	9820	1
	Post CT	9275	-5

Tableau 4.11 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes REF entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 64j, Pre CT = 105j, Post CT = 126j et Finale = 336j).

Éprouvette	Période	α	Variation (%)	R ²
PCT1	Initiale	-0,001		0,46
	Pre CT			
	Post CT	0,0003		0,02
	Finale	-0,00002	-107	0,00
PCT2	Initiale	-0,0019		0,70
	Pre CT	-0,0007	63	0,28
	Post CT	-0,0001	86	0,00
	Finale	-0,0005	29	0,27
PCT3	Initiale	-0,0013		0,18
	Pre CT	0,0003	123	0,50
	Post CT	-0,0009	-400	0,27
	Finale	-0,0004	-233	0,06
CT1	Initiale	-0,0002		0,04
	Pre CT	0,0002	200	0,46
	Post CT	0,0011	450	0,31
	Finale	0,0024	1100	0,67
CT2	Initiale	-0,001		0,22
	Pre CT	-0,0002	80	0,20
	Post CT	-0,00007	65	0,00
	Finale	0,0021	1150	0,47
CT3	Initiale	-0,0002		0,05
	Pre CT	0,0008	500	0,93
	Post CT	-0,0006	-175	0,08

Les résultats obtenus pendant la période multi-endommagement des éprouvettes de référence montrent une distinction notable entre les PCT et CT. Les mesures d'allongement, de masse, d'UPV et NIRAS confirment bien qu'il y a eu dégradation au fur et à mesure des essais après l'application du choc thermique. Cependant, ces paramètres montrent que la dégradation a continué à se faire alors qu'aucun autre choc thermique n'était appliqué.

- RAS

Les résultats des éprouvettes RAS pour les essais NRUS sont présentés à deux échéances : la première (106 jours) et la dernière (297 jours). Les résultats de deux éprouvettes sont présentés : RAS-PCT3 et RAS-CT3. Le reste des valeurs se retrouve en annexe 5.

Dans le cas de l'éprouvette RAS-PCT3 (figure 4.42 et 4.43), il y a une légère augmentation de la fréquence de résonance entre les deux échéances : passage de 9540 Hz à 9625 Hz. À propos du décalage fréquentiel à une même échéance, il est inexistant dans les deux cas et n'évolue pas entre les deux échéances. Les valeurs de α (figure 4.44) ont diminué entre les deux dates : évolution de 0,0004 à 0,0001. Les valeurs de R^2 des courbes de tendances permettant la détermination de α sont faibles.

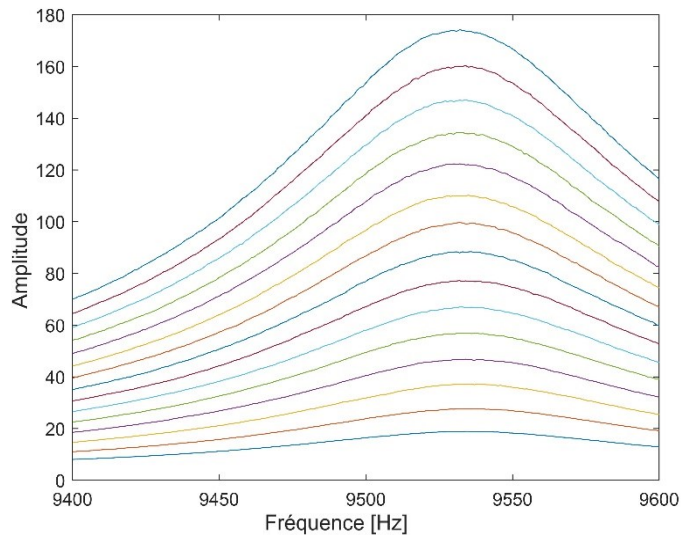


Figure 4.42 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 106 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-PCT3)

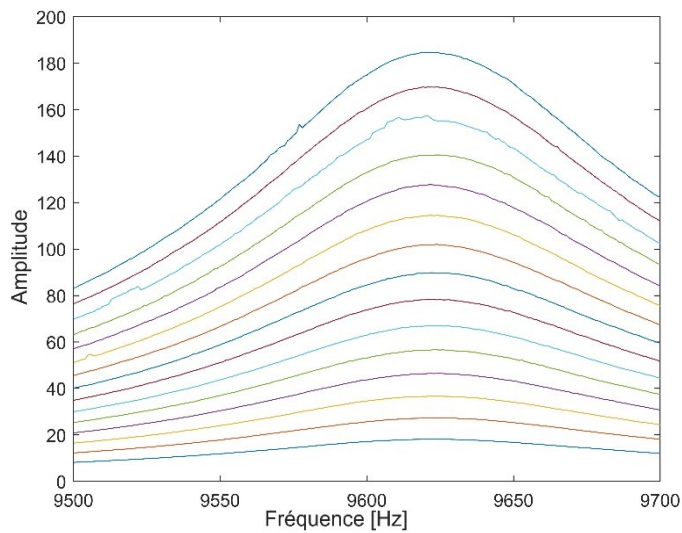


Figure 4.43 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 297 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-PCT3)

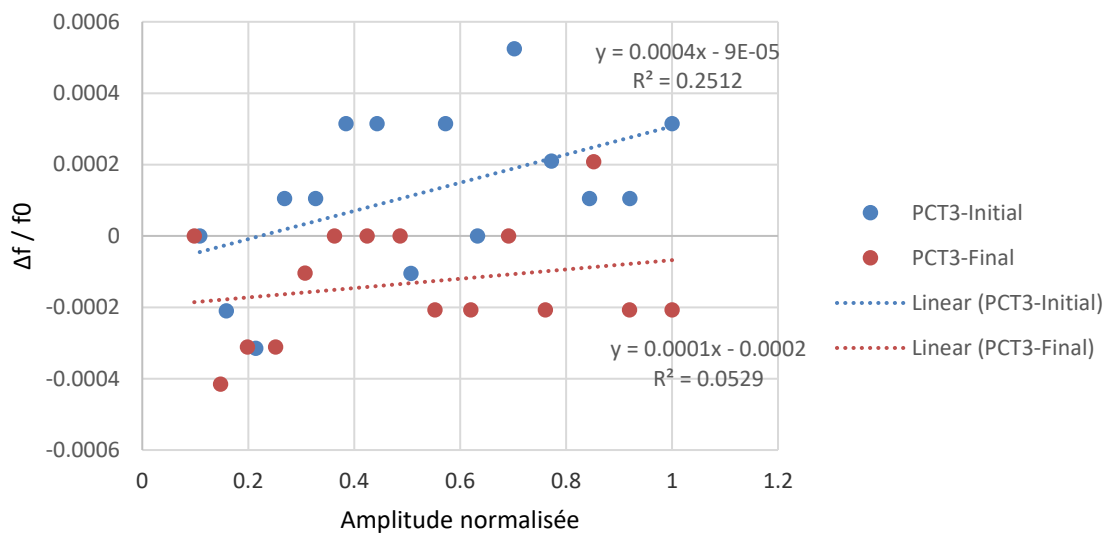


Figure 4.44 - Évolution du paramètre α à 106 et 297 jours (RAS-PCT3)

Pour l'éprouvette RAS-CT3, Il y a un décalage fréquentiel observable à 106 jours (figure 4.45) : variation de 9370 Hz pour 100 Hz d'impulsion à 9350 Hz pour 800 Hz d'impulsion. À 297

jours, il n'y a pas de décalage fréquentiel apparent. Il y a un alignement de la fréquence de résonance à 7800 Hz. Entre les deux échéances, la fréquence de résonance initiale diminue passant de 9370 Hz à 7800 Hz.

Pour les variations de α (figure 4.47), il y a une baisse de la valeur entre les deux dates : 0,003 à -0,0001. Le R^2 pour la première date est « bon » (0,88) contrairement au second qui est proche de 0.

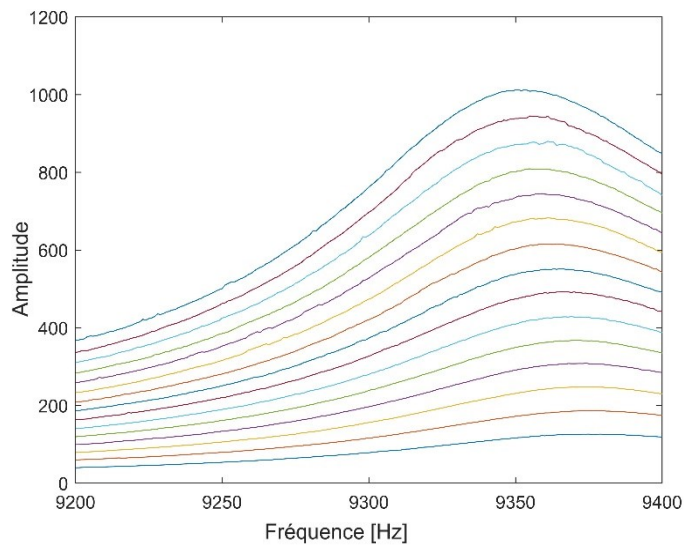


Figure 4.45 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 106 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-CT3)

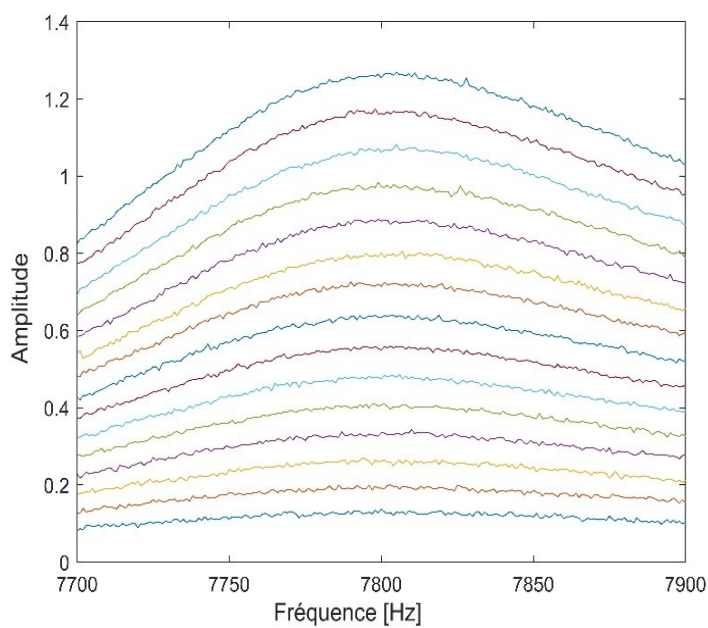


Figure 4.46 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 297 jours pour une éprouvette RAS (NRUS-RAS-CT3)

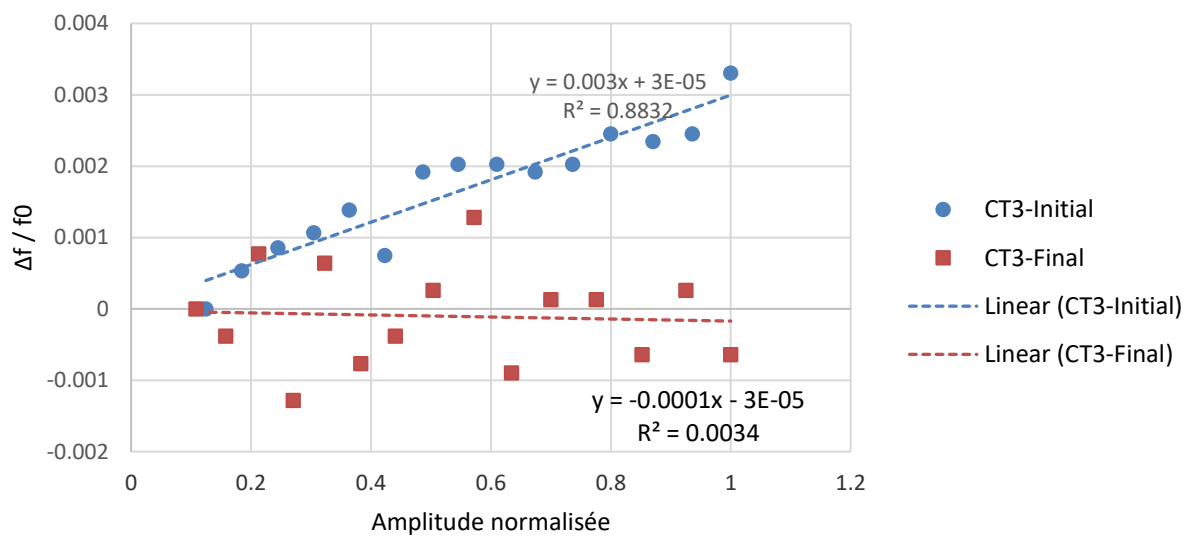


Figure 4.47 - Évolution du paramètre α à 106 et 297 jours (RAS-CT3)

En analysant les résultats moyens de toutes les éprouvettes avant le choc thermique, il y a, en moyenne, une baisse d'environ 1% de la fréquence de résonance à jeune âge (tableau 4.12). Le paramètre α moyen (tableau 4.13) baisse en moyenne de 335% avant l'application du choc thermique. Cependant, les valeurs de R^2 pour ces essais ne sont pas bonnes (moyenne de 0,27 tout le long des essais). Les résultats ne sont donc pas exploitables.

Après le choc thermique, l'analyse du décalage de la fréquence de résonance initiale des éprouvettes montre une distinction notable entre les éprouvettes PCT et CT. Les éprouvettes CT ont des fréquences de résonance initiales qui diminuent au cours du temps. En revanche, les fréquences des éprouvettes PCT ne varient pas pendant la période post CT. À long terme, les fréquences augmentent de 2% en moyenne. Cette augmentation signifierait une rigidification du béton au cours du temps malgré la réactivité du béton.

Dans le cas des PCT, il y a une augmentation des valeurs du paramètre α au cours du temps. Aussi bien à court terme (post CT) et à long terme (dernières valeurs mesurées : 297 jours après le gâchage). Cependant, certaines valeurs sont incohérentes : en effet sans application de choc thermique dans le cas des PCT, on observe une augmentation moyenne de près de 200%.

Dans le cas des éprouvettes CT, à court terme l'application du choc thermique n'est pas détectable par les variations du paramètre α . L'éprouvette CT2 a une variation haussière (+263%) alors que CT1 et CT 3 ont des valeurs baissières de 8900% et 150% respectivement. Ces dispersions de valeurs démontrent leur incohérence et donc leur inexploitation. De plus, les valeurs des R^2 sont faibles (moyenne à 0,27).

Tableau 4.12 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 106j, Pre CT = 119j, Post CT = 140j et Finale = 297j).

Éprouvette	Période	Fréquence (Hz)	Variation (%)
PCT1	Initiale	9376	
	Pre CT	9210	-2
	Post CT	9200	0
	Finale	9370	2
PCT2	Pre CT	8600	
	Post CT	8620	0
	Finale	8710	1
PCT3	Initiale	9535	
	Pre CT	9450	-1
	Post CT	9450	0
	Finale	9620	2
CT1	Initiale	9443	
	Pre CT	9390	-1
	Post CT	8790	-6
CT2	Initiale	9452	
	Pre CT	9340	-1
	Post CT	8650	-7
	Finale	8750	-6
CT3	Initiale	9381	
	Pre CT	9300	-1
	Post CT	8760	-6
	Finale	7800	-16

Tableau 4.13 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes RAS entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 106j, Pre CT = 119j, Post CT = 140j et Finale = 297j).

Éprouvette	Période	α	Variation (%)	R ²
PCT1	Initiale	0,0006		0,30
	Pre CT	-0,001	-267	0,23
	Post CT	0,00008	108	0,00
	Finale	0,0001	110	0,02
PCT2	Pre CT	-0,002		0,41
	Post CT	-0,0002	90	0,03
	Finale	0,0009	145	0,65
PCT3	Initiale	0,0004		0,25
	Pre CT	-0,0004	-200	0,08
	Post CT	0,0012	400	0,40
	Finale	0,0001	125	0,05
CT1	Initiale	0,0003		0,19
	Pre CT	-0,00002	-107	0,00
	Post CT	-0,0018	-8900	0,46
CT2	Initiale	-0,00007		0,01
	Pre CT	-0,0008	-1043	0,26
	Post CT	0,0013	263	0,06
	Finale	-0,0025	-213	0,66
CT3	Initiale	0,003		0,88
	Pre CT	0,0012	-60	0,93
	Post CT	-0,0006	-150	0,08
	Finale	-0,0001	-108	0,00

- ESA

Pour l'endommagement par attaque sulfatique externe, les résultats sont présentés pour les éprouvettes ESA-PCT2 (figure 4.48 et 4.49) et ESA-CT3 (figure 4.51 et 4.52). Dans le cas de la première, il y a un alignement de la fréquence de résonance à 9790 Hz pour toutes les sollicitations à la première échéance (27 jours). Dans le cas de la dernière échéance (127 jours), il y a un décalage fréquentiel vers les basses fréquences lors de l'augmentation des sollicitations de 100 Hz à 800 Hz : passage de 9990 Hz à 9970 Hz.

Les variations de α pour l'éprouvette ESA-PCT2 (figure 4.50), la valeur à 27 jours est négative, donc non exploitable. Les deux autres valeurs avant et après le choc thermique sont

respectivement 0,001 et 0,0019 avec des R^2 de 0,68 et 0,76. On remarque une augmentation de la valeur de α au cours du temps.

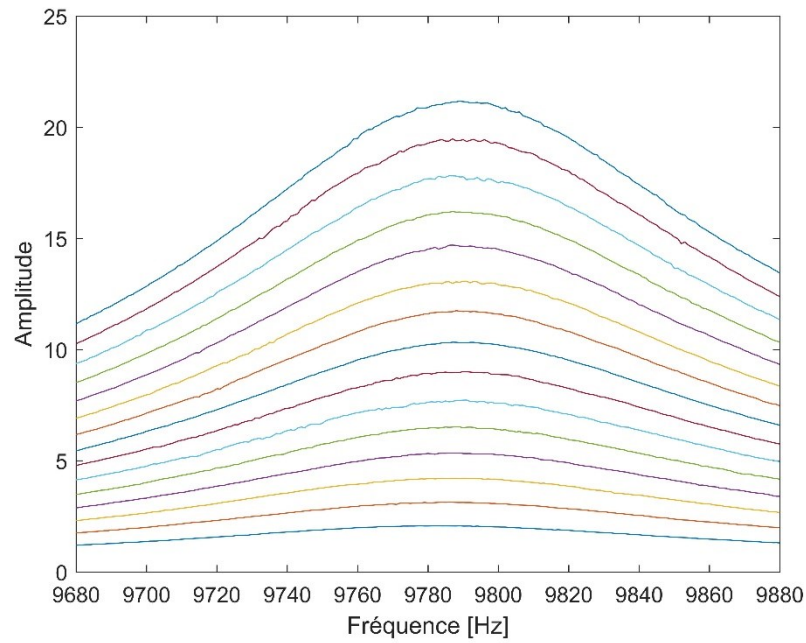


Figure 4.48 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 27 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-PCT2)

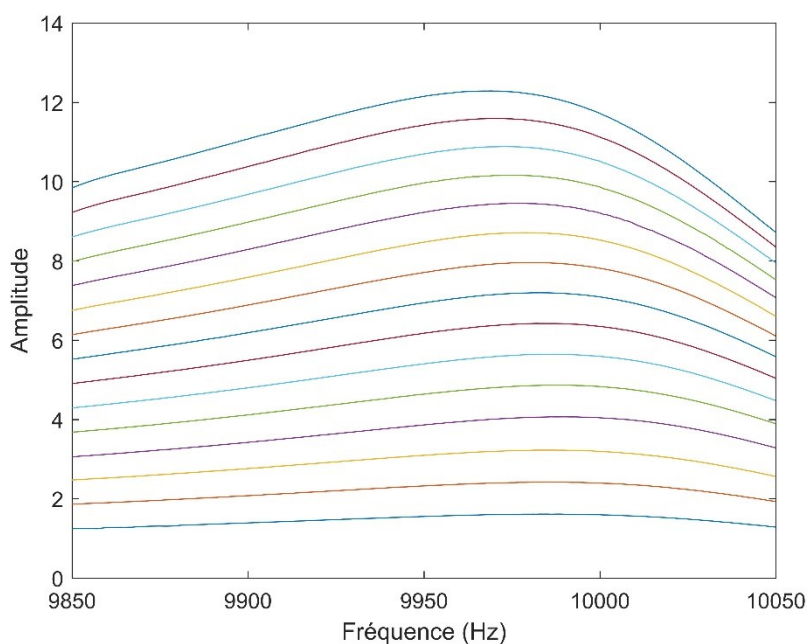


Figure 4.49 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-PCT2)

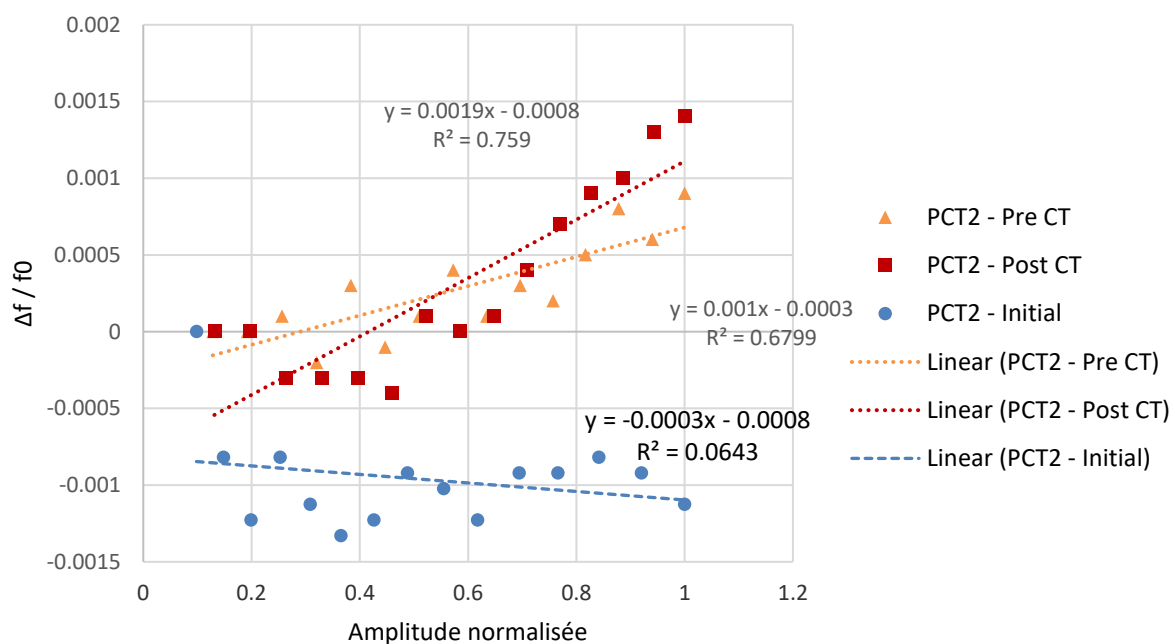


Figure 4.50 - Évolution du paramètre α à 27, 119 et 127 jours (ESA-PCT2)

Pour l'éprouvette CT3, il y a un alignement de la fréquence de résonance aux deux échéances. Cependant, la fréquence de résonance initiale diminue entre les deux dates : passage de 9720 Hz à 9370 Hz. Ce comportement est retrouvé dans les variations de α (figure 4.53). Il y a augmentation du paramètre : passage de -0,0005 à 0,0023. La valeur négative de la première n'est pas cohérente par son signe. De plus, le R^2 correspondant est faible : 0,31.

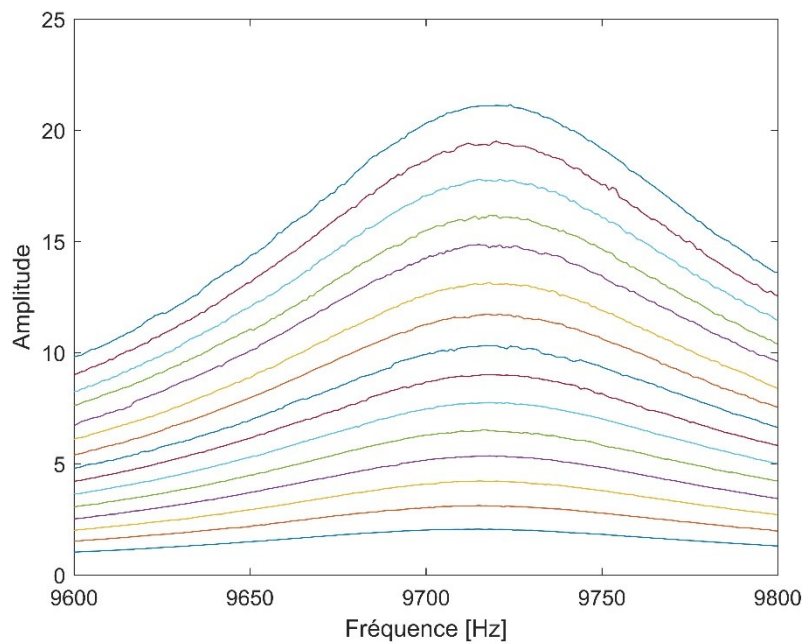


Figure 4.51 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 27 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-CT3)

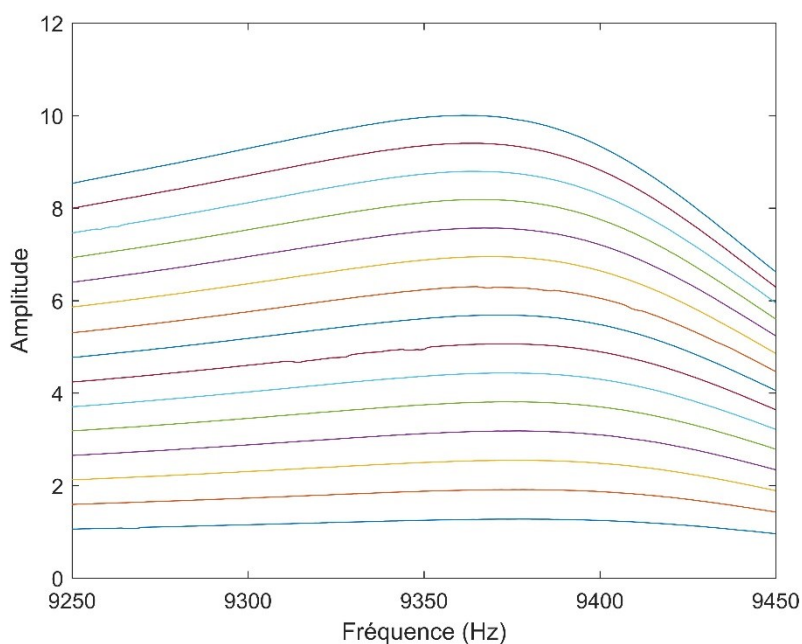


Figure 4.52 - Évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'essai NRUS à 127 jours pour une éprouvette ESA (NRUS-ESA-CT3)

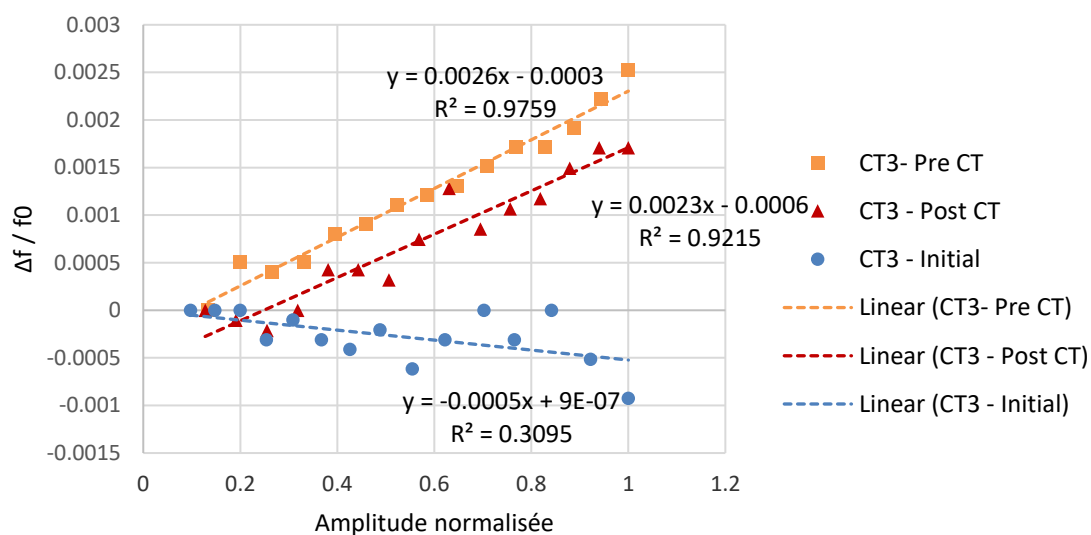


Figure 4.53 - Évolution du paramètre α à 27, 119 et 127 jours (ESA-CT3)

Les variations de fréquence de résonance initiale avec la méthode NRUS sont similaires à celles obtenues par la méthode NIRAS. Pour le paramètre α (tableau 4.15), il y a une augmentation significative pour toutes les éprouvettes entre les échéances initiales (premières mesures) et celles avant le choc thermique. Cependant, certaines valeurs de α sont négatives, leurs valeurs de R^2 correspondantes sont très faibles. Les valeurs initiales ne sont donc pas pertinentes pour être exploitées. Cependant, les valeurs pre-choc thermique présentent des R^2 bien supérieurs (proche de 0,9, voire supérieur) et peuvent donc être exploitées pour l'analyse dans la partie 2. Les différents résultats obtenus indiquent que la dégradation supposée par l'attaque sulfatique externe du béton n'est pas percevable à travers les différents essais.

À la suite de l'application du choc thermique, la fréquence de résonance initiale (tableau 4.14) des éprouvettes CT diminue en moyenne de 6% avec la méthode NRUS. La fréquence de résonance des éprouvettes PCT est inchangée entre les deux échéances.

L'application du choc thermique influence l'évolution du paramètre α des éprouvettes CT, une augmentation moyenne de 92% est notée. Cependant, le α des éprouvettes PCT augmente aussi de 120% en moyenne, ce qui est contradictoire puisque ces éprouvettes n'ont pas subi de choc thermique. Les deux variations étant du même ordre, il est possible de dire que le choc thermique n'a pas influencé le paramètre α mesuré avec la méthode NRUS.

Tableau 4.14 - Variation des fréquences de résonance initiales pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 27j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).

Éprouvette	Période	Fréquence (Hz)	Variation (%)
PCT 1	Initial	9710	
	Pre CT	9993	3
	Post CT	9936	-1
PCT 2	Initial	9778	
	Pre CT	9987	2
	Post CT	9983	0
PCT 3	Initial	9781	
	Pre CT	9978	2
	Post CT	9917	-1
CT 1	Initial	9741	
	Pre CT	9956	2
	Post CT	9378	-6
CT 2	Initial	9698	
	Pre CT	9912	2
	Post CT	9309	-6
CT 3	Initial	9715	
	Pre CT	9911	2
	Post CT	9377	-5

Tableau 4.15 - Variation des valeurs du paramètre α pour les éprouvettes ESA entre chaque période pour l'essai NRUS (Initiale = 27j, Pre CT = 119j et Post CT = 127j).

Éprouvette	Période	α	Variation (%)	R ²
PCT 1	Initial	-0,0003		0,07
	Pre CT	0,0013	533	0,90
	Post CT	0,0029	123	0,98
PCT 2	Initial	-0,0003		0,06
	Pre CT	0,001	433	0,68
	Post CT	0,0019	90	0,76
PCT 3	Initial	-0,0003		0,09
	Pre CT	0,0019	733	0,94
	Post CT	0,0047	147	0,97
CT 1	Initial	-0,0005		0,28
	Pre CT	0,0008	260	0,71
	Post CT	0,0031	288	0,98
CT 2	Initial	-0,0003		0,05
	Pre CT	0,0014	567	0,79
	Post CT	0,0014	0	0,65
CT 3	Initial	-0,0005		0,31
	Pre CT	0,0026	620	0,98
	Post CT	0,0023	-12	0,92

4.2.4 Observations au MEB

- Référence

Les observations au MEB ont permis d'avoir des informations visuelles complémentaires afin de compléter certains résultats. La totalité des photographies se trouve en annexes (annexe n°1). L'image de la figure 4.54 est présentée afin d'illustrer les observations. L'échantillon visualisé est issu d'une éprouvette brisée suite à un essai de traction indirecte. On observe des cristaux d'ettringite interconnectés provenant de couches plus importantes d'ettringite. Les quantités d'ettringite observées étaient importantes et réparties sur tous les échantillons observés.

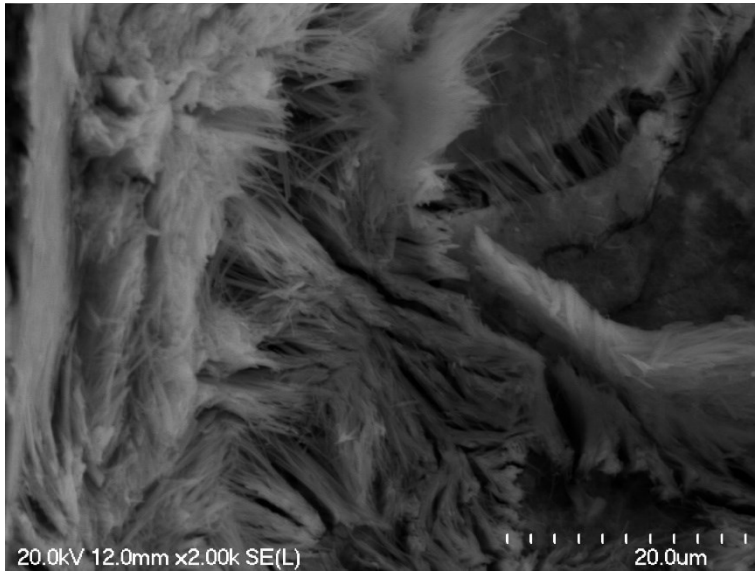


Figure 4.54 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon d'une éprouvette REF-CT à 34 semaines.

- RAS

Les observations au MEB à 44 semaines des éprouvettes RAS-CT montrent la présence d'ettringite autour des granulats (figure 4.55). À l'inverse, les éprouvettes PCT ne présentent aucune trace d'ettringite (annexe 1).

Des fissures sont visibles dans les figures des éprouvettes REF et RAS (pour les PCT et CT). Dans ce cas, les fissures ne peuvent pas être attribuées à des réactions de gonflement interne (RAS et formation d'ettringite) car les échantillons proviennent d'éprouvettes ayant subi un essai de traction indirecte les ayant fissurées davantage.

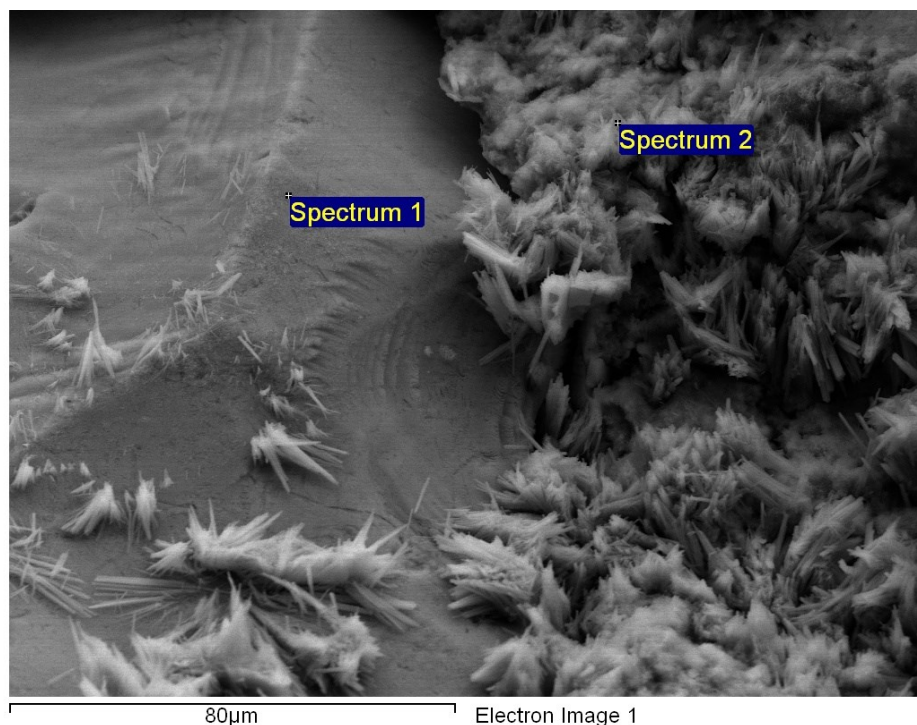


Figure 4.55 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon d'une éprouvette RAS-CT à 44 semaines.

4.2.5 Damage Rating Index

Les résultats du DRI (figure 4.56) montrent les indices pétrographiques en fonctions des endommagements REF et RAS. Ces résultats sont présentés pour les éprouvettes CT et PCT dans chacun des cas.

Les éprouvettes RAS ont une répartition des indices pétrographiques similaire. Cependant, les fissures dans la pâte de ciment (fissures PC) et les fissures dans les granulats avec présence de gel (fissure granulat + gel) sont plus nombreuses dans l'éprouvette RAS-PCT : respectivement 115 et 107. Ainsi, le DRI de l'éprouvette RAS-PCT (473) est supérieur à celui de l'éprouvette RAS-CT (362).

La distinction entre les éprouvettes REF-PCT et REF-CT est considérable : les valeurs respectives des DRI sont 132 et 864. Les paramètres les plus importants dans ce dernier sont le

décollement des granulats et les fissures de la pâte de ciment (fissure PC). Ils représentent respectivement 64% et 18% du DRI. Une explication à ces résultats est la différence du coefficient de dilatation thermique entre les granulats et la pâte de ciment qui, lors du choc thermique, a créé les décollements. Dans notre cas, les mesures de DRI sont faites à une seule date. Aucune étude de l'évolution de l'endommagement n'est possible. Les résultats du DRI ne peuvent donc pas être utilisés pour conclure sur l'évolution des endommagements.

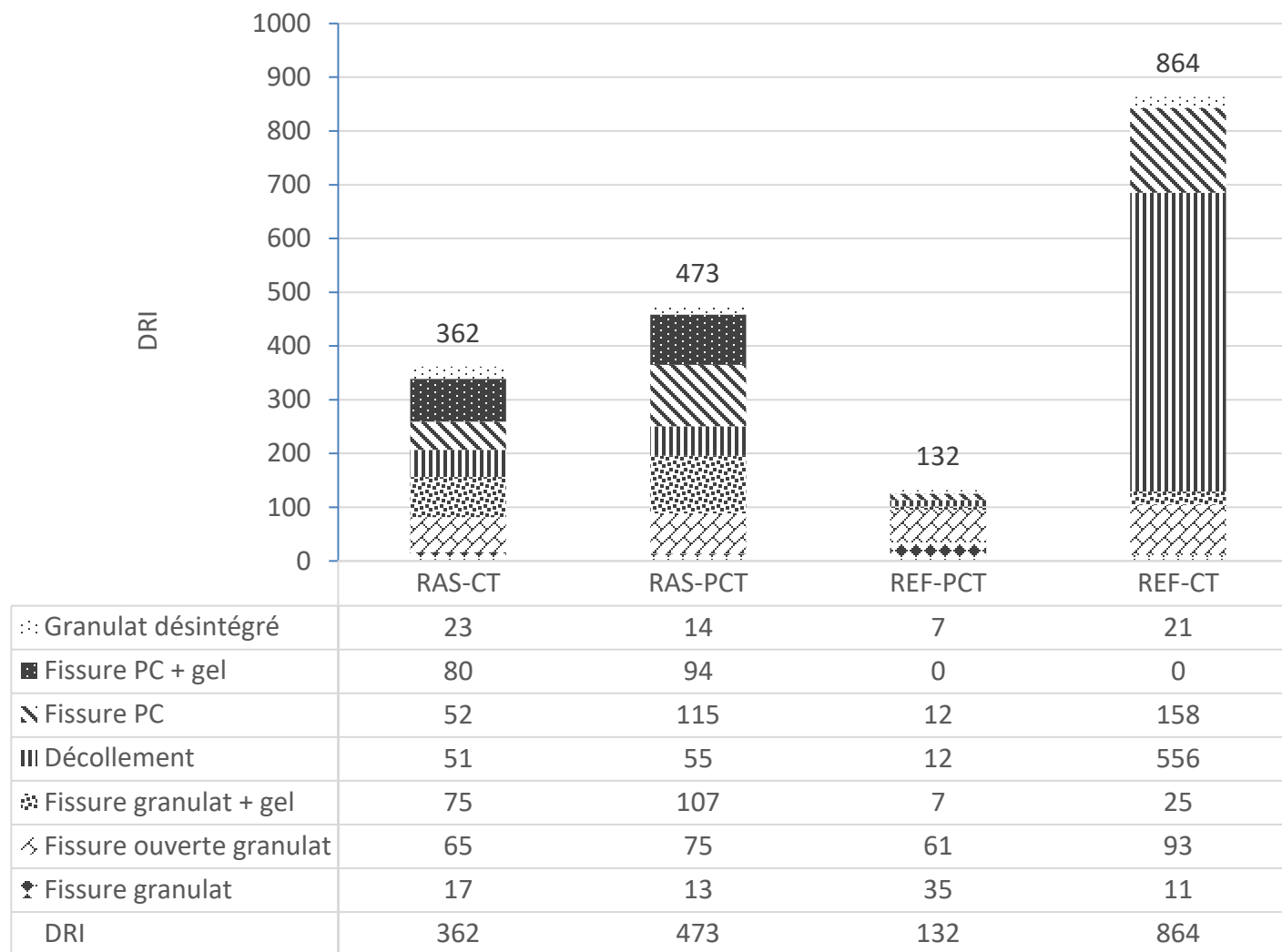


Figure 4.56 – Valeurs des DRI en fonction des indices pétrographiques pour des éprouvettes CT et PCT des endommagements REF et RAS.

5 DISCUSSION

L'objectif de ce chapitre de confronter les résultats et la méthodologie utilisée avec la littérature, en vue de conclure sur la validité des méthodes ANL.

5.1 COMPARAISON DES METHODES NIRAS ET NRUS

La comparaison des résultats entre les deux méthodes montre un même comportement : les corrélations linéaires (valeurs de R^2) sont toutefois de moins bonne qualité avec la méthode NRUS dans le cas des endommagements REF et RAS. En revanche, dans le cas de l'endommagement ESA, les valeurs de R^2 sont plus élevées et proches des valeurs de la méthode NIRAS. Soulignons que pour les trois endommagements, plus les valeurs de α sont élevées, plus les valeurs de R^2 augmentent. C'est-à-dire que les corrélations linéaires pour la détermination de α sont meilleures.

Des essais complémentaires ont été menés pour expliquer ces variations : pourquoi les valeurs de α restent faibles dans le cas de l'endommagement par RAS et REF malgré le développement d'endommagement, confirmé par les autres mesures et observations ?

Une explication pourrait être l'influence de la teneur en eau des éprouvettes sur la non-linéarité du béton. Les mesures (méthode NRUS) sur les éprouvettes ESA étant réalisées après le cycle de séchage, l'humidité relative des éprouvettes est plus faible dans ce cas. Les travaux de Kodjo en 2008 [6] démontraient que l'augmentation de l'humidité du béton atténue sa non-linéarité. Dans ce sens, l'essai NRUS a de nouveau été réalisé sur une éprouvette (REF - CT2) avec une période précédant l'essai aux conditions du laboratoire (température et humidité relative) d'une semaine (initialement 24 heures). Les résultats de ces essais ont permis de visualiser des décalages fréquentiels différents entre les deux échéances.

La figure 5.1 présente les variations d'amplitude en fonction de la fréquence avant le séchage. La figure 5.2 montre ces mêmes variations après une semaine de séchage. Cette dernière

présente un décalage fréquentiel plus important traduisant un α sept fois plus important qu'avant le séchage. De plus, la valeur de R^2 correspondante est proche de 1. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.1.

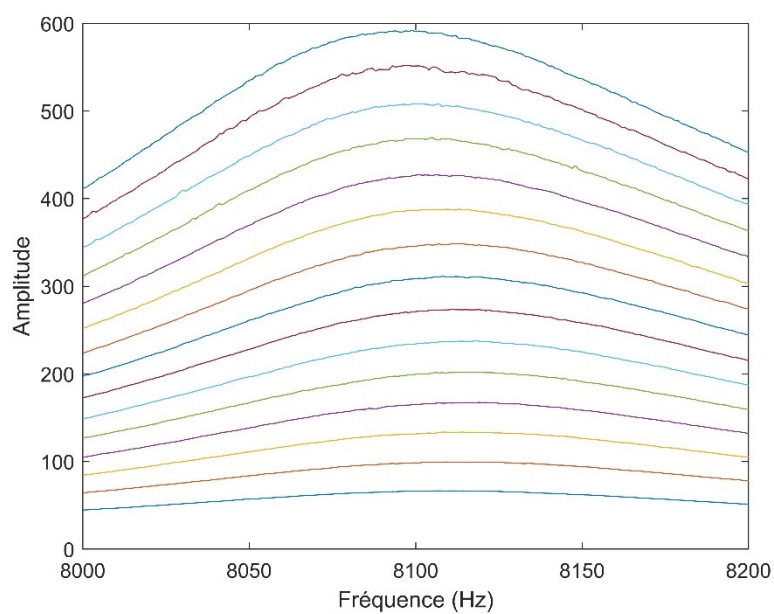


Figure 5.1 - Variation de l'amplitude en fonction de la fréquence pour l'éprouvette REF - CT2 avec la méthode NRUS 52 semaines après le gâchage, avant séchage.

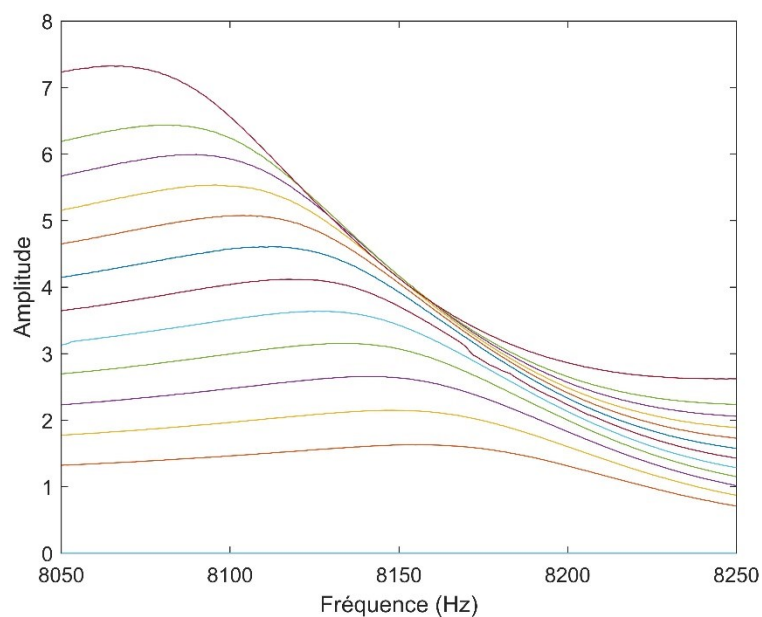


Figure 5.2 - Variation de l'amplitude en fonction de la fréquence après une semaine de séchage pour l'éprouvette REF - CT2 avec la méthode NRUS 53 semaines après le gâchage

Tableau 5.1 - Valeurs obtenues avant et après le séchage de l'éprouvette REF - CT2 lors de l'essai complémentaire avec la méthode NRUS

	Avant séchage	Après séchage
α	0,0021	0,0149
R^2	0,4693	0,9967

Cet essai complémentaire permet d'expliquer les faibles valeurs de α dans le cas des endommagements RAS et REF, et donc les basses valeurs de R^2 . Cet essai permet de confirmer aussi la sensibilité plus importante de l'essai NRUS à l'humidité que l'essai NIRAS dans ces conditions et ce protocole d'étude.

5.2 SUIVI DE LA COMBINAISON D'ENDOMMAGEMENT PAR METHODES ACOUSTIQUES NON LINEAIRES

5.2.1 ESA

Dans le cas des éprouvettes ESA, il a été expliqué qu'aucun endommagement n'avait été détecté avant l'application du choc thermique. L'explication probable est que la durée d'exposition du béton aux sulfates. En effet, l'exposition débute 28 jours après le gâchage, c'est-à-dire que, pendant la période mono endommagement, les éprouvettes sont exposées aux sulfates pendant 92 jours. Cette période est courte pour détecter une dégradation du béton dû aux sulfates avec les paramètres mesurés. Hartell [73] détectait les effets de l'exposition aux sulfates sur le béton avec la méthode UPV à partir de 6, 18 et 24 mois selon les conditions d'expositions (5% Na_2SO_4). Dans ces conditions Cumming [74] détectait une baisse des valeurs d'UPV qu'après 13 semaines d'exposition. L'acoustique non linéaire, peu importe la méthode utilisée, n'a pas permis de détecter la dégradation par attaques sulfatiques externes à jeune âge. De même avec les autres paramètres mesurés.

Une étude à jeunes âges d'attaque sulfatique externe avec caractérisation par NIRAS a été réalisée avec des concentrations en Na_2SO_4 plus importantes que celle utilisée dans notre étude : 15% dans le cas de [62].

À la suite du choc thermique, la comparaison des valeurs des R^2 montre que les résultats sont de meilleures qualités dans le cas de NIRAS. Les variations de α montrent la même tendance. Cela indique que la méthode NIRAS a permis de contrôler l'application du choc thermique combiné à l'attaque sulfatique externe précédemment appliquée. Ce n'a pas été le cas pour la méthode NRUS.

5.2.2 REF

Dans le cas des éprouvettes de référence, aucun endommagement n'est détecté avant l'application du choc thermique tant par les essais destructifs que non destructifs. Cette observation est conforme au protocole de l'étude parce qu'aucun endommagement n'était censé se développer dans ces éprouvettes.

Les variations des résultats (masse, allongement, UPV et NIRAS) à la suite du choc thermique confirment son effet d'endommagement sur les paramètres mesurés, destructifs et non destructifs. Les vitesses UPV diminuent au cours du temps pour les éprouvettes CT. La fréquence de résonance initiale diminue et les valeurs de α augmentent pour ces mêmes éprouvettes au cours du temps. Ces variations indiquent une dégradation suite au choc thermique s'aggravant au cours du temps. Les baisses de résistance à la compression, à la traction et du module d'Young (figures 4.9, 4.11 et 4.13 du chapitre Résultats) confirment la dégradation des propriétés mécaniques. À la suite de ces résultats, des observations au MEB ont été réalisées montrant la présence d'ettringite en grande quantité, responsable de l'endommagement progressif post-choc thermique.

Les paramètres mesurés avec la méthode NIRAS montrent des variations permettant de détecter cet endommagement en cours : la fréquence de résonance initiale des éprouvettes CT diminue et α augmente pour ces mêmes éprouvettes. Cependant, aucune information provenant de cette méthode ne permet de connaître la nature de l'endommagement, d'où l'utilité d'essais complémentaires comme les observations au MEB. Dans le cas de méthode NRUS, les variations de α ne permettent pas de voir le développement de l'endommagement. La méthode NIRAS a donc permis de suivre la combinaison d'endommagement, contrairement à la méthode NRUS. De plus, il n'est pas possible de conclure dans cette étude que le paramètre de non linéarité α permet de détecter l'endommagement en cours de développement plus rapidement que la méthode UPV ou autres paramètres mesurés. La densité des données après l'application du choc thermique n'est pas suffisante. Les mêmes variations sont retrouvées pour les différents paramètres. Il serait nécessaire d'avoir plus de données pour analyser les « périodes intermédiaires » (périodes entre lesquelles il y a des données manquantes).

5.2.3 RAS

Le suivi de l'endommagement par RAS avec les méthodes NIRAS et NRUS est mitigé. En effet, les variations de α permettent, avec la méthode NIRAS, de suivre le développement de la RAS uniquement à jeune âge (avant l'application du choc thermique). Pour savoir si les mesures du paramètre α permettent de détecter plus rapidement que les autres méthodes, il serait nécessaire d'avoir des données complémentaires entre les échéances déjà obtenues. Dans le cas de la méthode NRUS, l'incohérence des résultats n'a permis aucune interprétation possible.

Dans le cas des éprouvettes atteintes de RAS et subissant le choc thermique, les variations de α à court et long terme permettent de détecter la dégradation par l'augmentation des valeurs de α et avec les essais complémentaires (UPV ou essais destructifs). Cette remarque est valable uniquement dans le cas des essais NIRAS. Sans ces essais complémentaires, il n'est pas possible de suivre l'endommagement par RAS, car les variations des valeurs de α entre échantillons subissant le même protocole sont importantes. Comme mentionné dans la partie précédente, les valeurs de R^2 obtenues lors des essais NRUS ne permettent pas une interprétation précise des résultats. En effet, malgré une dégradation confirmée d'autres paramètres (destructifs et non destructifs), les valeurs de α ne varient pas dans le même sens.

6 CONCLUSION

L'étude apporte une contribution à l'évaluation de l'endommagement mixte des bétons de laboratoire. Les réactions de gonflement internes sont une préoccupation majeure pour les gestionnaires d'ouvrages. L'intérêt pour des solutions technologiques permettant le diagnostic et la caractérisation de ces endommagements le plus tôt possible est majeur. Ces solutions permettraient par la suite de mettre en place des protocoles de suivis adaptés pour atteindre ou allonger la durée de vie utile des structures en béton. L'étude de combinaisons d'endommagements sur le béton est donc nécessaire pour se rapprocher des conditions réelles d'exposition des structures.

Les travaux de recherche avaient pour but d'évaluer les méthodes d'acoustiques non linéaires NIRAS (*Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy*) et NRUS (*Nonlinear Resonance Ultrasound Spectroscopy*) dans le cas de combinaisons d'endommagements subis par des éprouvettes en béton. Les endommagements en question étaient la réaction alcalis-silice et l'attaque sulfatique externe combinée chacune à un choc thermique.

L'évaluation des méthodes NIRAS et NRUS a été faite en analysant et en mesurant le coefficient de non-linéarité α et la variation linéaire des fréquences de résonance. L'évaluation a été complétée par l'utilisation d'autres méthodes destructives et non destructives : mesure de masse et d'allongement, d'UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*), examen pétrographique selon la méthode du *Damage Rating Index (DRI)*, observations au MEB (*Microscope Électronique à Balayages*), résistance à la compression, traction et mesure du module d'Young.

Les formulations des bétons étaient sans adjuvants ni ajouts cimentaires, avec un rapport E/C de 0,5. Les endommagements étaient provoqués par des formulations spécifiques : utilisation de granulats *Placitas* et ajout de $NaOH$ (0,95% Na_2O_{eq}) dans le cas de la RAS et des conditions d'exposition spécifiques : contrôle de l'humidité (100%) et température d'exposition (38°C) des éprouvettes ainsi que de leurs solutions de stockage. Dans le cas de l'attaque sulfatique externe, l'endommagement a été créé par un stockage à immersion totale des éprouvettes dans une solution de sulfate de sodium dosée à 5%. Le choc thermique était réalisé en plaçant les

éprouvettes dans une étuve à 150°C pendant trois heures puis immédiatement immergé dans de l'eau à température ambiante (20°C) pendant dix minutes.

Cette étude a mené à une perte respectivement de 46% et 68% des résistances à la compression entre les échéances initiales et finales pour les éprouvettes de référence et RAS ayant subi un choc thermique. Une perte de 66% et 84% des modules d'Young pour ces mêmes éprouvettes. Les vitesses de propagation des ondes de compression ont aussi été affectées : perte respective de 18% et 12%. L'examen pétrographique selon le DRI a permis d'obtenir des valeurs de 362 et 864 pour les éprouvettes de référence et RAS ayant subi le choc thermique. Des valeurs de 473 et 132 respectivement pour celles ne l'ayant pas subi.

Les conclusions qui peuvent être formulées pour cette étude sont les suivantes:

La méthode NRUS n'a pas permis de suivre et caractériser adéquatement l'évolution des endommagements et leurs combinaisons. Plus précisément, les valeurs obtenues du paramètre α n'ont pas permis l'analyse des endommagements. La raison à cela est la teneur en eau proche de la saturation dans les éprouvettes lors des expérimentations, ce qui atténue grandement le comportement non-linéaire du béton. Cette caractéristique n'a été valable que pour la méthode NRUS.

La méthode NIRAS a permis de vérifier les résultats obtenus avec la méthode NRUS. En effet, compte tenu de la bonne qualité des résultats NIRAS, il était possible de les comparer aux résultats NRUS pour étudier la pertinence de ces derniers. Cela a été possible grâce à l'obtention des valeurs de R^2 . Elles permettent de juger la qualité des paramètres α obtenus. Cependant, cette comparaison entre les résultats NIRAS et NRUS a été possible avec les résultats additionnels obtenus avec les autres méthodes de caractérisation utilisées dans ce projet (masse, allongement, UPV).

Les résultats montrent que l'application du choc thermique affecte tous les paramètres mesurés: masse, allongement, UPV, fréquences de résonance initiales et α pour les méthodes NRUS et NIRAS dans le cas de la RAS. Dans le cas l'ESA, on observe le même comportement, mais pas dans le cas de la masse. L'application du choc thermique n'affecte pas la masse des éprouvettes. On constate pour les éprouvettes RAS, une accélération de la dégradation du matériau. Pour ces

dernières, il est possible de dire qu'il existe une synergie entre l'application du choc thermique et le développement de la RAS.

Lorsque la combinaison d'endommagement est de faible intensité, c'est-à-dire que la dégradation affecte peu les propriétés mécaniques du matériau alors le paramètre α mesuré est exploitable pour caractériser l'endommagement. Cela est valable pour la méthode NIRAS puisque les résultats de la méthode NRUS n'ont pas été pertinents. Cependant, lorsque l'intensité de la combinaison d'endommagement est importante (propriétés mécaniques fortement affectées) alors les mesures ne sont plus pertinentes.

Il est important de noter que l'utilisation de la méthode NIRAS a été plus facile et pratique que la méthode NRUS dans le cas de cette étude. Le placement et l'extraction du capteur piézoélectrique sur les éprouvettes pour la méthode NRUS et l'attente de l'émission des ondes acoustiques ont ralenti les procédures d'acquisition de données. Les mesures réalisées sur six éprouvettes prismatiques prenaient une heure avec la méthode NIRAS alors qu'avec la méthode NRUS, les mêmes mesures prenaient 8 heures dans le meilleur des cas.

Suite à ces résultats et conclusions, plusieurs perspectives de travaux futurs et de développement seraient à étudier. Une perspective qui serait à développer serait la caractérisation des matériaux ; notamment par Diffraction aux Rayons X (DRX) ; utilisés lors de la formulation des bétons (ciment et granulats). Dans cette étude, la formation d'ettringite dans les bétons n'était pas prévue dans le protocole expérimental. Une des pistes à étudier pour avoir une explication précise est de connaître la composition des matériaux utilisés dans la formulation du béton. Des résultats complémentaires sur ce point aideraient à comprendre le développement non prévu d'ettringite dans l'étude, que ce soit pour les éprouvettes de référence ou l'endommagement par RAS.

L'étude réalisée a été faite avec des formulations sans adjuvants ni ajouts cimentaires et sans variation de rapport E/C . Le rapport E/C d'un béton a une influence sur sa porosité capillaire et donc sur sa perméabilité. Ainsi, le rapport E/C modifie les échanges entre le béton et les liquides, gaz et ions environnants. Le rapport E/C change donc la capacité du béton à résister à un endommagement de sources externes. Le rapport E/C ayant une influence sur les propriétés

intrinsèques du béton, il aurait une influence sur la nonlinéarité du matériau lorsqu'il se dégrade. Il est quasiment impossible de trouver un béton dans l'industrie sans un ajout cimentaire ou adjuvant. Le développement des endommagements étudiés peut varier en fonction de la formulation du béton et notamment la présence d'ajouts et/ou adjuvants. Ainsi, l'étude en ajoutant ces éléments aux formulations et en faisant varier le rapport E/C serait pertinente pour analyser la variabilité des résultats en fonction de différentes formulations. De plus, l'étude se rapprocherait des problématiques industrielles.

Un deuxième aspect qui serait à développer est l'analyse avec des éprouvettes extraites de structures existantes. Les éprouvettes créées dans les laboratoires sont soumises à des conditions d'expositions contrôlées de façon précise. L'étude sur des bétons soumis à des conditions réelles d'expositions (conditions climatiques et conditions de chargements) permettrait de comparer les résultats à ceux obtenus en laboratoire. Cela permettrait d'apporter des conclusions sur l'utilisation de la méthode NIRAS dans l'industrie. Méthode qui selon nos résultats semble plus robuste que la méthode NRUS.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. C. Gerwick, “The Economic Aspects of Durability - How Much Added Expense Can Be Justified?,” in *Third CANMET / ACI International Conference on Durability of Concrete*, 1994, pp. 1–20.
- [2] ASTM International, “ASTM C805 - Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.”
- [3] ASTM International, “ASTM C803 - Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete.”
- [4] P. Azarsa and R. Gupta, “Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, pp. 1–30, 2017.
- [5] B. Assouli, F. Simescu, G. Debicki, and H. Idrissi, “Detection and identification of concrete cracking during corrosion of reinforced concrete by acoustic emission coupled to the electrochemical techniques,” *NDT E Int.*, vol. 38, no. 8, pp. 682–689, Dec. 2005.
- [6] A. Kodjo, “Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l’acoustique non linéaire. Application à la Réaction alcalis-silice,” Université de Sherbrooke; Université de Cergy-Pontoise, 2008.
- [7] K. L. Kreitman, “Nondestructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation.,” The University of Texas at Austin, 2011.
- [8] C. Payan, V. Garnier, J. Moysan, and P. A. Johnson, “Applying nonlinear resonant ultrasound spectroscopy to improving thermal damage assessment in concrete,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, no. 4, pp. EL125-EL130, Apr. 2007.
- [9] K. J. Lesnicki, J.-Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, “Accelerated Determination of ASR Susceptibility During Concrete Prism Testing Through Nonlinear Resonance Ultrasonic Spectroscopy,” 2013.
- [10] M. Rashidi, A. Paul, J.-Y. Kim, L. J. Jacobs, and K. E. Kurtis, “Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 95, no. February, pp. 1–8, 2017.
- [11] J. Lahdensivu and J. Aromaa, “Renovation of an alkali–aggregate reaction damaged swimming pool,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 3, pp. 1–8, Dec. 2015.

- [12] M.-A. Bérubé, N. Smaoui, B. Bissonnette, and B. Fournier, “Outil d’Évaluation et de Gestion des Ouvrages d’art Affectés de Réactions Alcalis-Silice (RAS),” 2005.
- [13] H. Pyy, E. Holt, and M. Ferreira, “An Initial Survey on the Occurrence of Alkali Aggregate Reaction in Finland,” Finland, 2012.
- [14] F. Rajabipour, E. R. Giannini, C. Dunant, J. H. Ideker, and M. D. A. Thomas, “Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 76, pp. 130–146, Oct. 2015.
- [15] B. Fournier and M.-A. Bérubé, “Alkali–Aggregate Reaction in Concrete: a Review of Basic Concepts and Engineering Implications,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 27, pp. 167–191, 2000.
- [16] F. Ulm, O. Coussy, L. Kefei, and C. Larive, “Thermo-chemo-mechanics of ASR expansion in concrete structures,” *J. Eng. Mech.*, vol. 126, no. 3, pp. 233–242, 2000.
- [17] M. Huang and S. Pietruszczak, “Modeling of Thermomechanical Effects of Alkali-Silica Reaction,” *J. Eng. Mech.*, vol. 125, no. 4, pp. 476–485, Apr. 1999.
- [18] Z. Itam, “Mesoscale Simulation of Alkali Silica Reaction,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 5, pp. 44–48, 2015.
- [19] R. H. Haddad and K. S. Numayr, “Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel bond,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 2, pp. 428–435, 2007.
- [20] D. R. Hurcomb, K. F. VonFay, and D. Albright, “Freezing and thawing and alkali-aggregate reaction weakens lightweight, structural concrete in North Dakota,” *Cem. Concr. Aggregates*, vol. 26, no. 1, pp. 9–13, Jun. 2004.
- [21] M. Collepardi, “A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 4, pp. 401–407, 2003.
- [22] J. A. Hartell, “Sodium Sulphate Attack on Concrete : Effect on Mechanical Properties,” McGill University, 2008.
- [23] N. Petrov and A. Tagnit-Hamou, “Approche Holistique de la Formation Différée de l’Ettringite,” 2015.
- [24] M. Santhanam, M. D. Cohen, and J. Olek, “Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 325–332, Mar. 2003.
- [25] B. Godart and L. Divet, “Réaction sulfatique dans les structures en béton - Mécanisme pathologie et prévention,” *Tech. l’Ingénieur*, no. 0, 2009.

- [26] A. Pavoine and X. Brunetaud, *Développement et validation d'une méthode d'essai vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2010.
- [27] A. Bernard, "Influence de la température de cure sur la formation d'ettringite différée dans les bétons," Université de Sherbrooke, 2017.
- [28] N. Leklou, "Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne," Université Paul-Sabatier Toulouse III, 2014.
- [29] A. Pavoine, X. Brunetaud, and L. Divet, "The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 521–528, Apr. 2012.
- [30] S. Kelham, "The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite Formation," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 18, no. 3, pp. 171–179, Jan. 1996.
- [31] T. Ramlochan, P. Zacarias, M. D. A. Thomas, and R. D. Hooton, "The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 6, pp. 807–814, Jun. 2003.
- [32] N. Petrov, "Combined effect of different factors on concrete expansion due to DEF," Université de Sherbrooke, 2003.
- [33] R. Achour, "Valorisation et Caractérisation de la Durabilité d'un Matériau Routier et d'un Béton à Base de Sédiments de Dragage," Université de Sherbrooke; Université Lille 1; Mines de Douai, 2013.
- [34] J. Gao, Z. Yu, L. Song, T. Wang, and S. Wei, "Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying–wetting cycles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 33–38, Feb. 2013.
- [35] L. Jiang, D. Niu, Y. Sun, and Q. Fei, "Ultrasonic testing and microscopic analysis on concrete under sulfate attack and cyclic environment," *J. Cent. South Univ.*, vol. 21, no. 12, pp. 4723–4731, Dec. 2014.
- [36] M. T. Bassuoni and M. L. Nehdi, "Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 3, pp. 206–226, Mar. 2009.
- [37] P. Morenon, "Modélisation des réactions de gonflement interne des bétons avec prise en compte des couplages poro-mécaniques et chimiques," Université de Toulouse, 2017.
- [38] D. Jana, "DEF and ASR in concrete - A systematic approach from petrography," in *30th International Conference on Cement Microscopy 2008*, 2008, pp. 203–219.

- [39] A. Campos, C. M. López, A. Blanco, and A. Aguado, “Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 668–683, 2018.
- [40] M. D. A. Thomas and T. Ramlochan, “Field cases of delayed ettringite formation,” in *International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, 2002, no. September, pp. 85–97.
- [41] J. Zhang, M. Sun, D. Hou, and Z. Li, “External sulfate attack to reinforced concrete under drying-wetting cycles and loading condition: Numerical simulation and experimental validation by ultrasonic array method,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 139, no. 12, pp. 365–373, May 2017.
- [42] M. Sargolzhahi, A. Kodjo, P. Rivard, and J. Rhazi, “Effectiveness of nondestructive testing for the evaluation of alkali–silica reaction in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 8, pp. 1398–1403, Aug. 2010.
- [43] Y. Boukari, D. Bulteel, P. Rivard, and N.-E. Abriak, “Combining nonlinear acoustics and physico-chemical analysis of aggregates to improve alkali–silica reaction monitoring,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 67, pp. 44–51, Jan. 2014.
- [44] A. International, *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete - C597*. .
- [45] F. Saint-Pierre, A. Philibert, B. Giroux, and P. Rivard, “Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 1022–1027, 2016.
- [46] Y. Shao, C. J. Lynsdale, C. D. Lawrence, and J. H. Sharp, “Deterioration of heat-cured mortars due to the combined effect of delayed ettringite formation and freeze/thaw cycles,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 11, pp. 1761–1771, Nov. 1997.
- [47] H. L. Romero, M. J. Casati, and J. C. Gálvez, “NDT for concrete under accelerated freeze/thaw tests and surface scaling,” in *fib Symposium*, 2011.
- [48] L. Sanchez, B. Fournier, M. Jolin, M. A. B. Bedoya, J. Bastien, and J. Duchesne, “Use of Damage Rating Index to Quantify Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete: Fine versus Coarse Aggregate,” *ACI Mater. J.*, vol. 113, no. 4, pp. 395–407, Aug. 2016.
- [49] P. E. Grattan-Bellew and L. D. Mitchell, “Quantitative petrographic analysis of concrete-the damage rating index (DRI) method, a review,” in *Proc. Marc-André Bérubé symposium on AAR in concrete, CANMET/ACI Advances in concrete technology seminar, Montréal, Canada*, 2006, pp. 321–334.
- [50] I. Sims, B. Hunt, and B. Miglio, “Quantifying Microscopical Examinations of Concrete for Alkali Aggregate Reactions (AAR) and Other Durability Aspects.,” in *G.M. Idorn International Symposium on Durability of Concrete*, 1992.

- [51] V. Villeneuve, “Détermination de l’Endommagement du Béton par Méthode Pétrographique Quantitative,” Université Laval, 2011.
- [52] L. Sanchez, T. Drimalas, B. Fournier, D. Mitchell, and J. Bastien, “Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 107, no. September 2017, pp. 284–303, May 2018.
- [53] A. Kodjo, F. Moradi-Marani, and P. Rivard, “Application Du Principe De L’acoustoélasticité Dynamique Pour La Surveillance In Situ Des Ouvrages De Génie Civil/Applying Dynamic Acoustoelasticity (D.A.E) Principle For In Situ Monitoring Of Civil Engineering Structures,” *Ann. du Bâtiment des Trav. Publics*, vol. 66, no. 1–3, p. 65, 2014.
- [54] P. Rasolofosaon, B. Zinszner, and P. A. Johnson, “Propagation des ondes élastiques dans les matériaux non linéaires. Aperçu des résultats de laboratoire obtenus sur les roches et des applications possibles en géophysique,” *Rev. l’Institut Français du Pétrole*, vol. 52, no. 6, pp. 585–608, 1997.
- [55] K. J. Leśnicki, J.-Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, “Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique,” *NDT E Int.*, vol. 44, no. 8, pp. 721–727, Dec. 2011.
- [56] Y. Boukari, “Contribution à la Caractérisation des Bétons Endommagés par la Réaction Alkali-Silice: Apports Combinés de Méthodes Physico-Chimiques et Acoustiques Non Linéaires,” Université de Sherbrooke; Mines de Douai, 2011.
- [57] M. Bentahar, H. El Aqra, R. El Guerjouma, M. Griffa, and M. Scalerandi, “Hysteretic elasticity in damaged concrete: Quantitative analysis of slow and fast dynamics,” *Phys. Rev. B*, vol. 73, no. 1, p. 014116, Jan. 2006.
- [58] A. Kodjo, P. Rivard, F. Cohen-Tenoudji, and J.-L. Gallias, “Impact of the alkali–silica reaction products on slow dynamics behavior of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 4, pp. 422–428, 2011.
- [59] A. Kodjo, P. Rivard, and G. Ballivy, “Effect of Micro-cracks Viscosity on the Nonlinear Acoustic Slow Dynamics Behavior of Concrete,” in *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 2015.
- [60] J. Chen, R. Bharata, T. Yin, Q. Wang, H. Wang, and T. Zhang, “Assessment of sulfate attack and freeze–thaw cycle damage of cement-based materials by a nonlinear acoustic technique,” *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 2, p. 105, Apr. 2017.
- [61] E. R. Giannini, “Evaluation of Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation,” The University of Texas at Austin, 2012.
- [62] V. Genovés, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Eiras, and J. Payá, “Preliminary study on

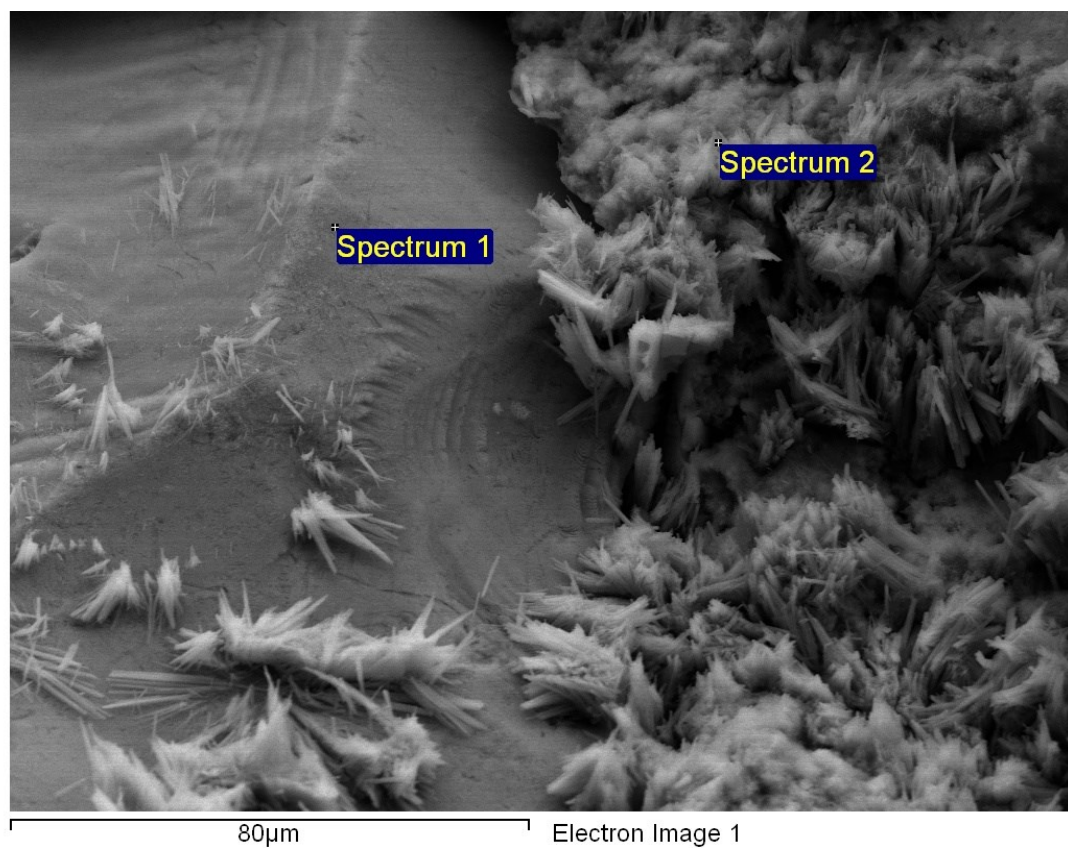
short-term sulphate attack evaluation by non-linear impact resonance acoustic spectroscopy technique,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 78, pp. 295–302, Mar. 2015.

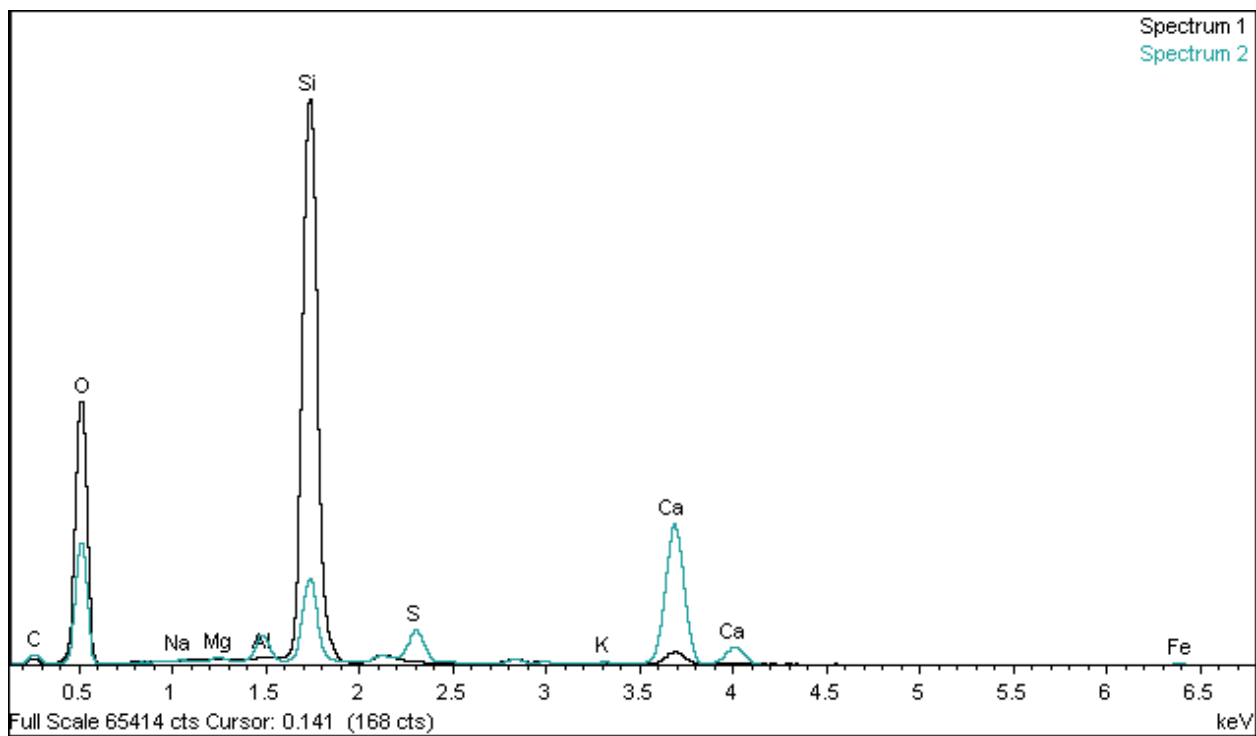
- [63] V. Genovés, F. Vargas, J. Gosálbez, A. Carrión, M. V. Borrachero, and J. Payá, “Ultrasonic and impact spectroscopy monitoring on internal sulphate attack of cement-based materials,” *Mater. Des.*, vol. 125, pp. 46–54, Jul. 2017.
- [64] J. Jin, M. G. Moreno, J. Riviere, and P. Shokouhi, “Impact-Based Nonlinear Acoustic Testing for Characterizing Distributed Damage in Concrete,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 36, no. 3, p. 51, Sep. 2017.
- [65] R. G. Mckeen, L. R. Lenke, and K. K. Pallachulla, “Mitigation of Alkali-Silica Reactivity in New Mexico,” 1998.
- [66] G. S. Austin and K. E. Coose, “Aggregate Reactivity And Concrete Durability In New Mexico,” 1998.
- [67] ASTM C1012, “Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution,” *ASTM Int. West Conshohocken, PA*, 2015.
- [68] ASTM C 490, “Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Past, Mortar, and Concrete,” *ASTM Int. West Conshohocken, PA*, vol. i, no. C, pp. 1–5, 2011.
- [69] “Mélasse,” *Wikipédia*. [Online]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mélasse>.
- [70] ASTM C597, “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete,” p. 4.
- [71] P. A. Johnson, J. A. TenCate, R. A. Guyer, and K. E. A. Van Den Abeele, “Resonant Nonlinear Ultrasound Spectroscopy,” 2001.
- [72] K. J. Leśnicki, J.-Y. Kim, K. E. Kurtis, and L. J. Jacobs, “Assessment of alkali–silica reaction damage through quantification of concrete nonlinearity,” *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 3, pp. 497–509, 2013.
- [73] J. A. Hartell, “Investigating various test methods for assessing the effect of sulfate attack on concrete properties,” McGill University, 2014.
- [74] S. R. Cumming, “Nondestructive Testing to Monitor Concrete Deterioration Caused by Sulfate Attack,” University of Florida, 2004.

8 ANNEXES

8.1 ANNEXE N°1 - MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE A BALAYAGE

- Spectre obtenu pour l'échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 par diffraction des rayons X du Microscope électronique à balayage à 44 semaines.





- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines à différents endroits de l'échantillon.

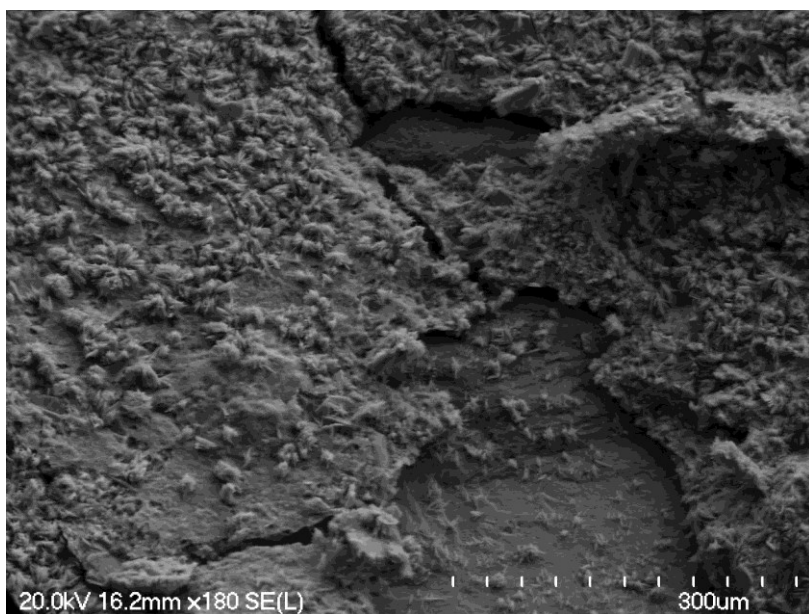


Figure 8.1 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines

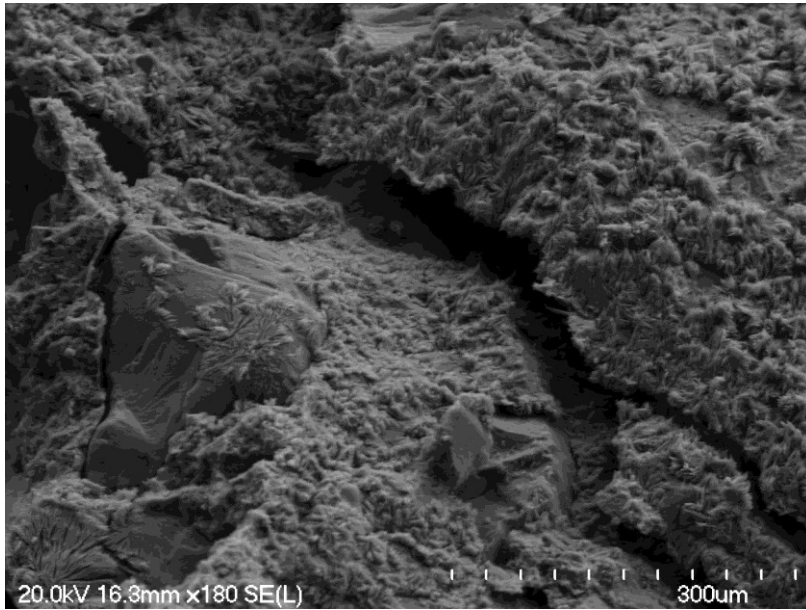


Figure 8.2 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines

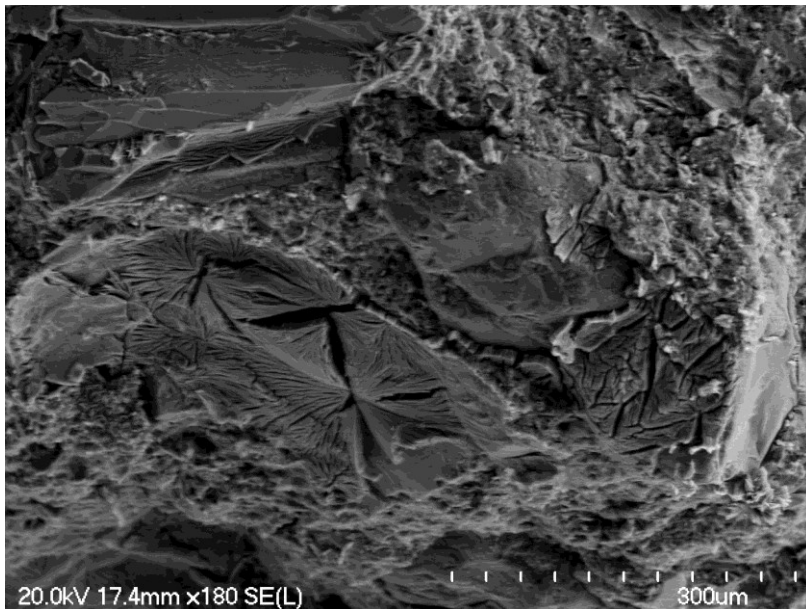


Figure 8.3 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT1 à 44 semaines

- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT2 à 44 semaines à différents endroits de l'échantillon.

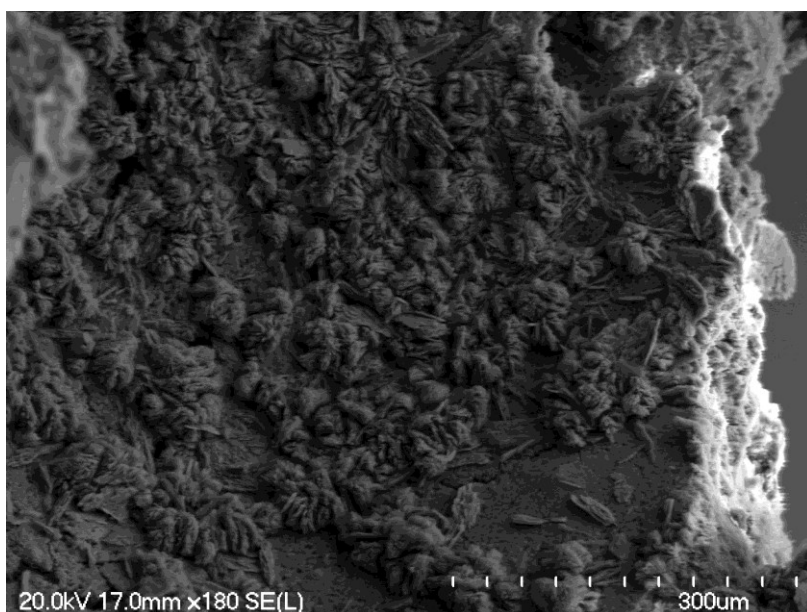


Figure 8.4 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT2 à 44 semaines

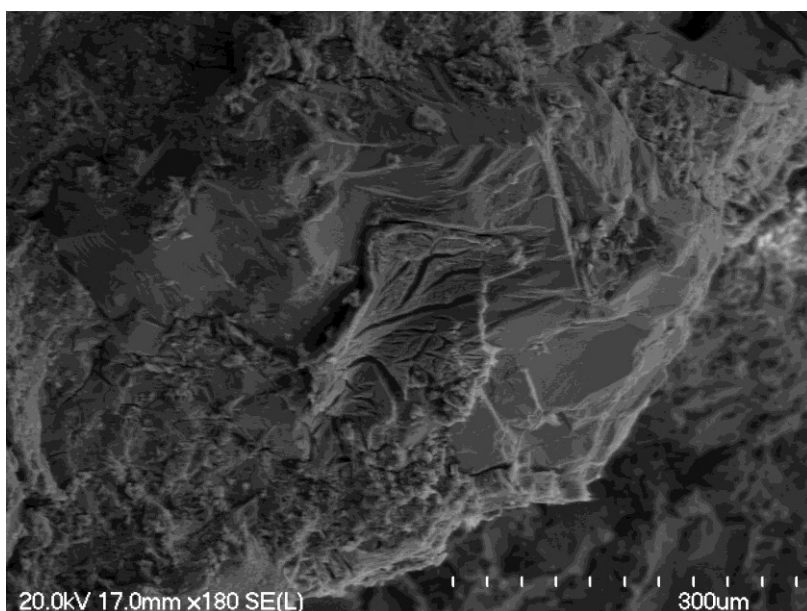


Figure 8.5 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT2 à 44 semaines

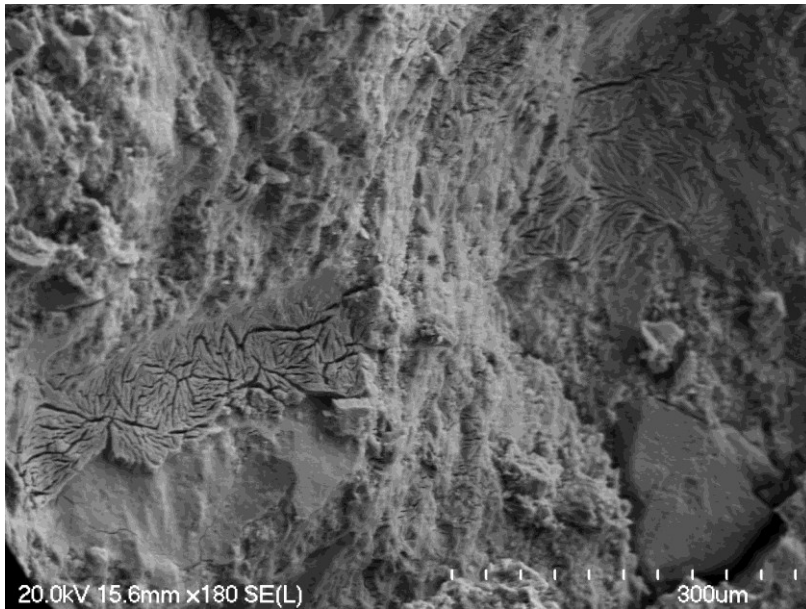


Figure 8.6 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-CT2 à 44 semaines

- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-PCT1 à 44 semaines pour différents grossissements.

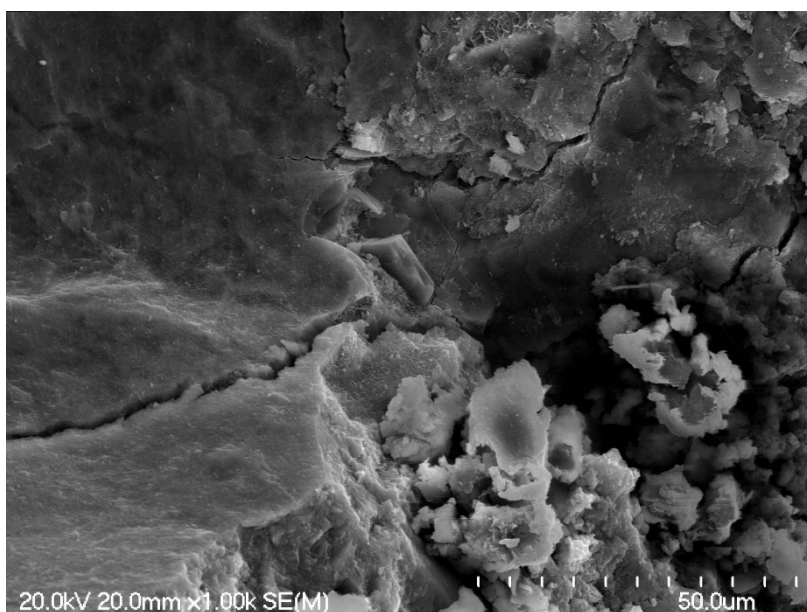


Figure 8.7 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-PCT1 à 44 semaines.

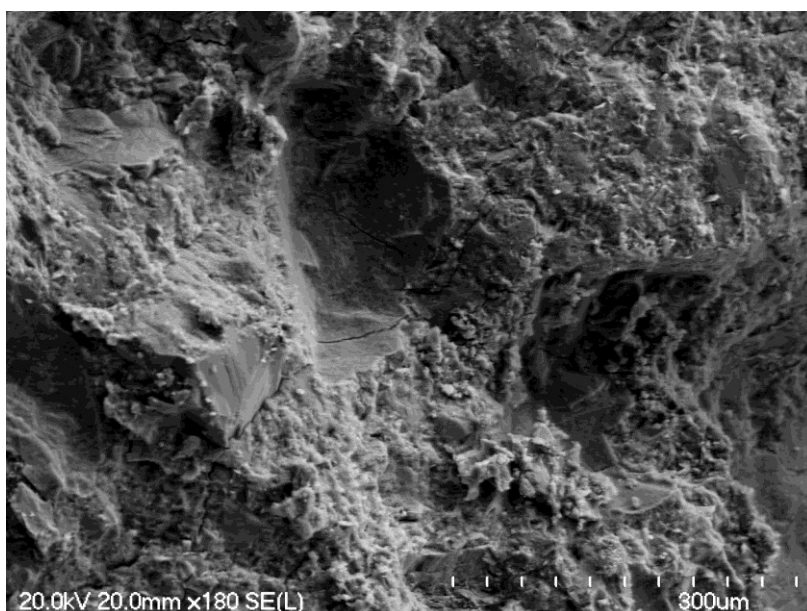


Figure 8.8 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-PCT1 à 44 semaines.

- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-PCT2 à 44 semaines.

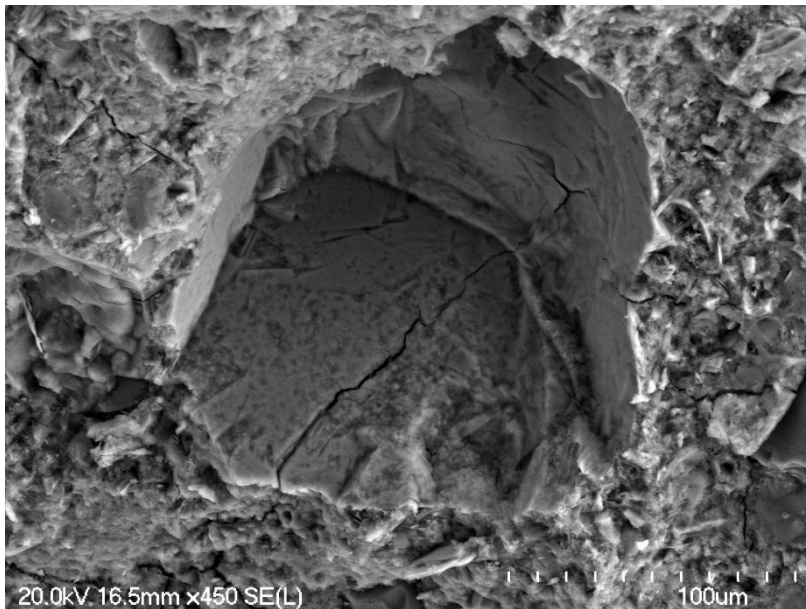


Figure 8.9 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette RAS-PCT2 à 44 semaines

- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-PCT1 à 34 semaines à différents endroits de l'échantillon et différents grossissements.

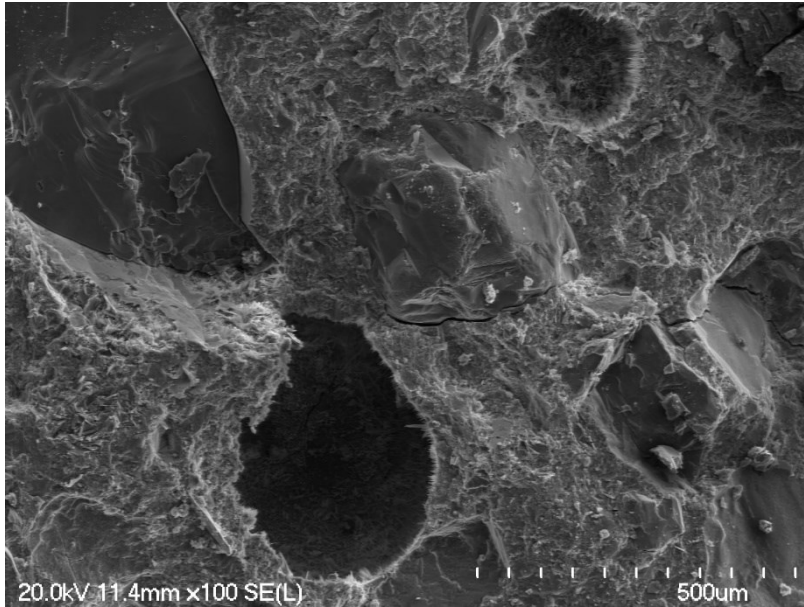


Figure 8.10 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-PCT1 à 34 semaines.

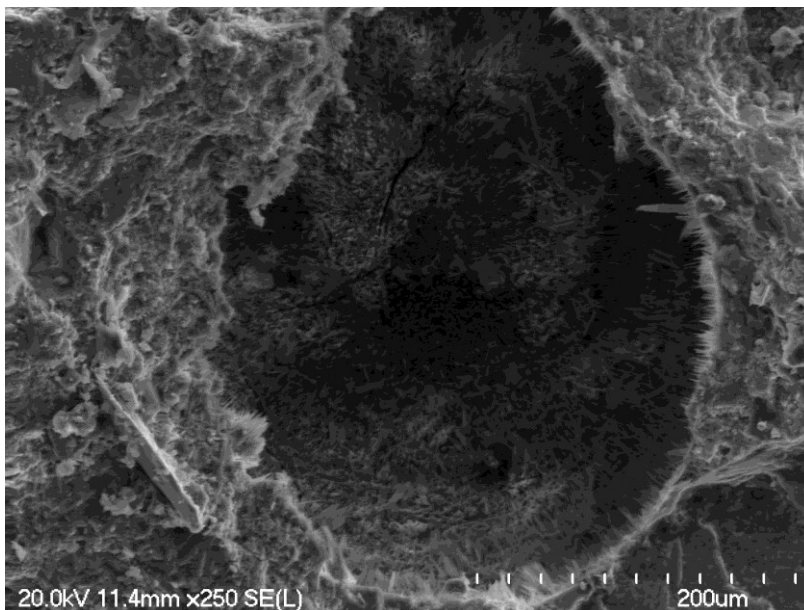


Figure 8.11 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-PCT1 à 34 semaines.

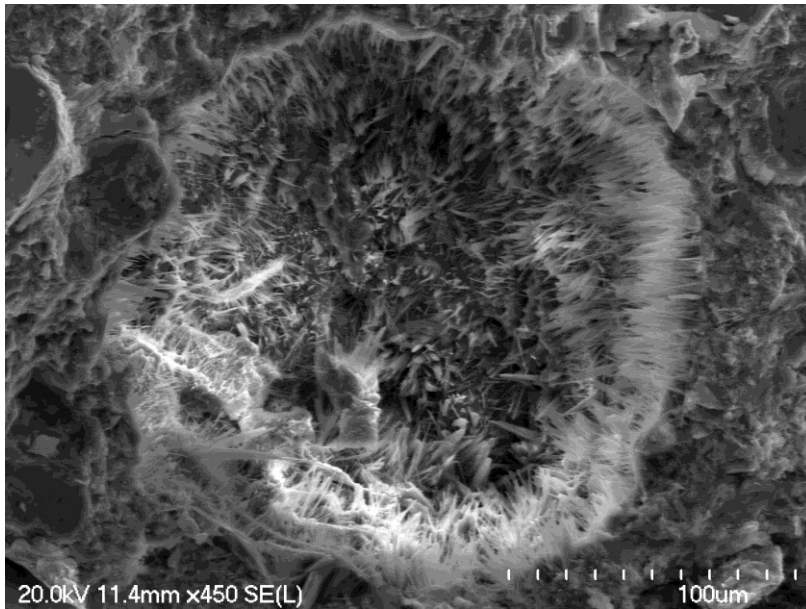


Figure 8.12 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-PCT1 à 34 semaines.

- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT1 à 34 semaines à différents endroits de l'échantillon et différents grossissements.

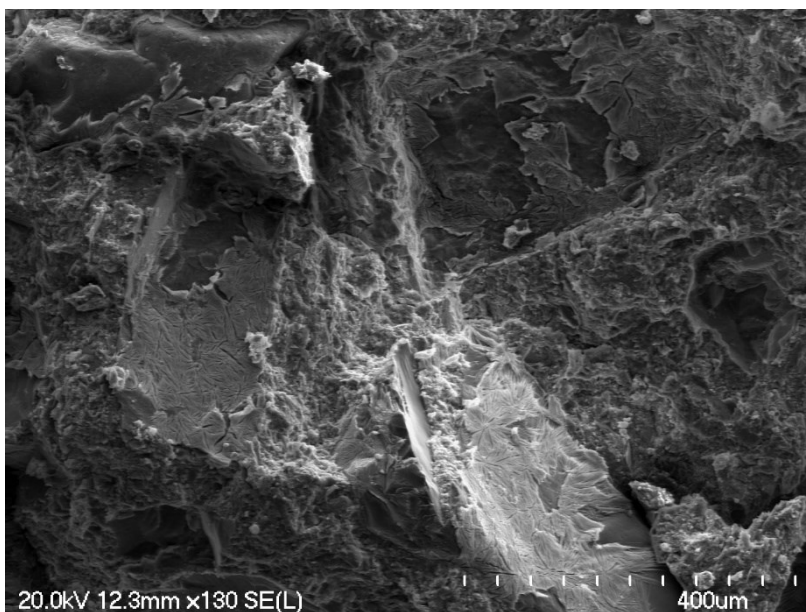


Figure 8.13 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT1 à 34 semaines.

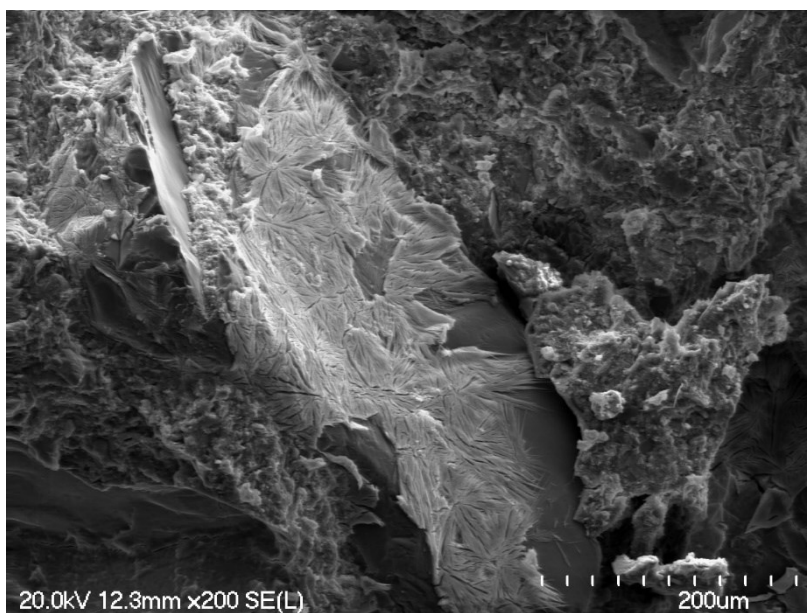


Figure 8.14 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT1 à 34 semaines

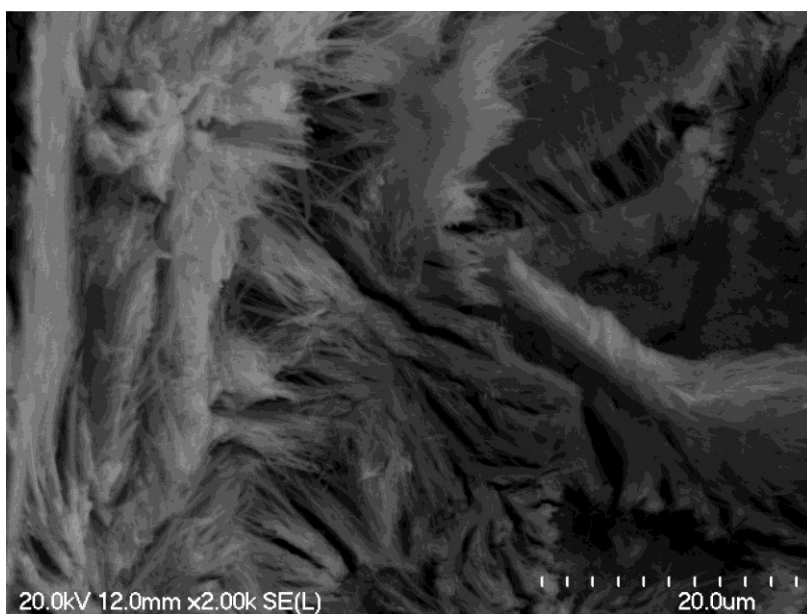


Figure 8.15 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT1 à 34 semaines

- Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT2 à 34 semaines à différents endroits de l'échantillon et différents grossissements.

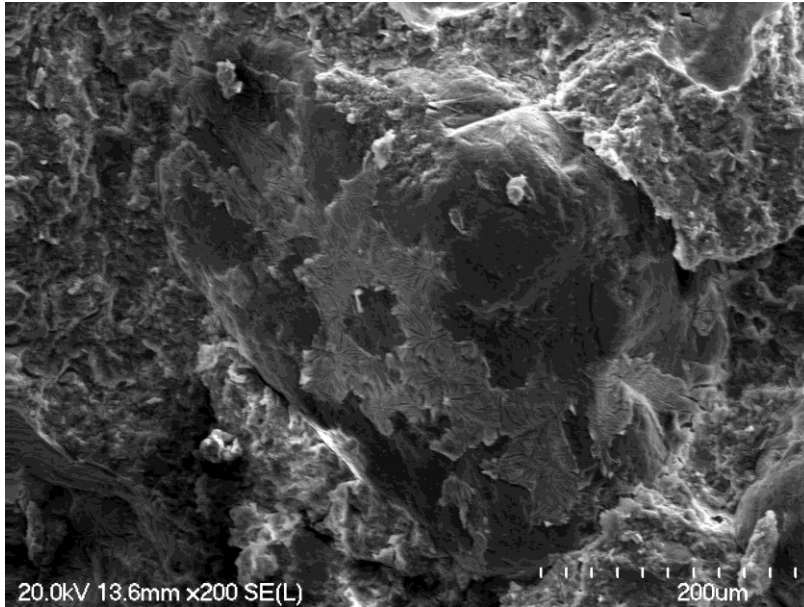


Figure 8.16 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT2 à 34 semaines

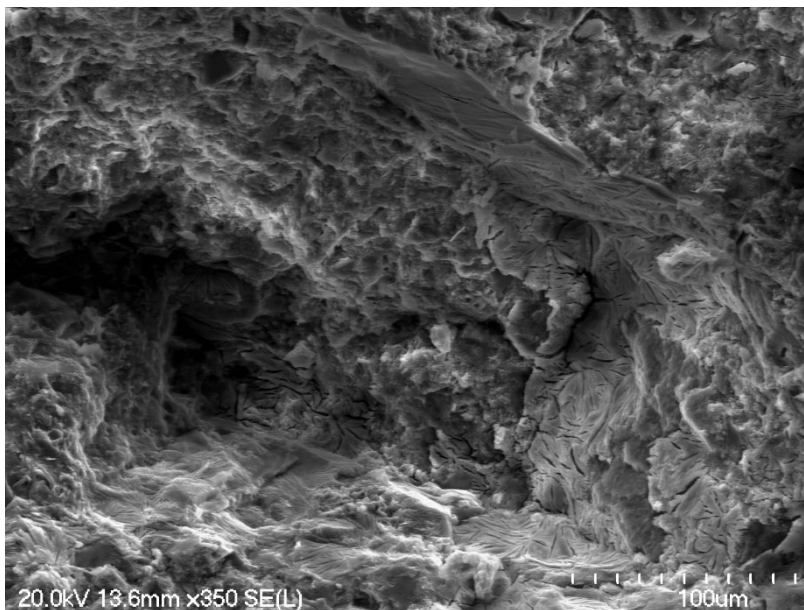
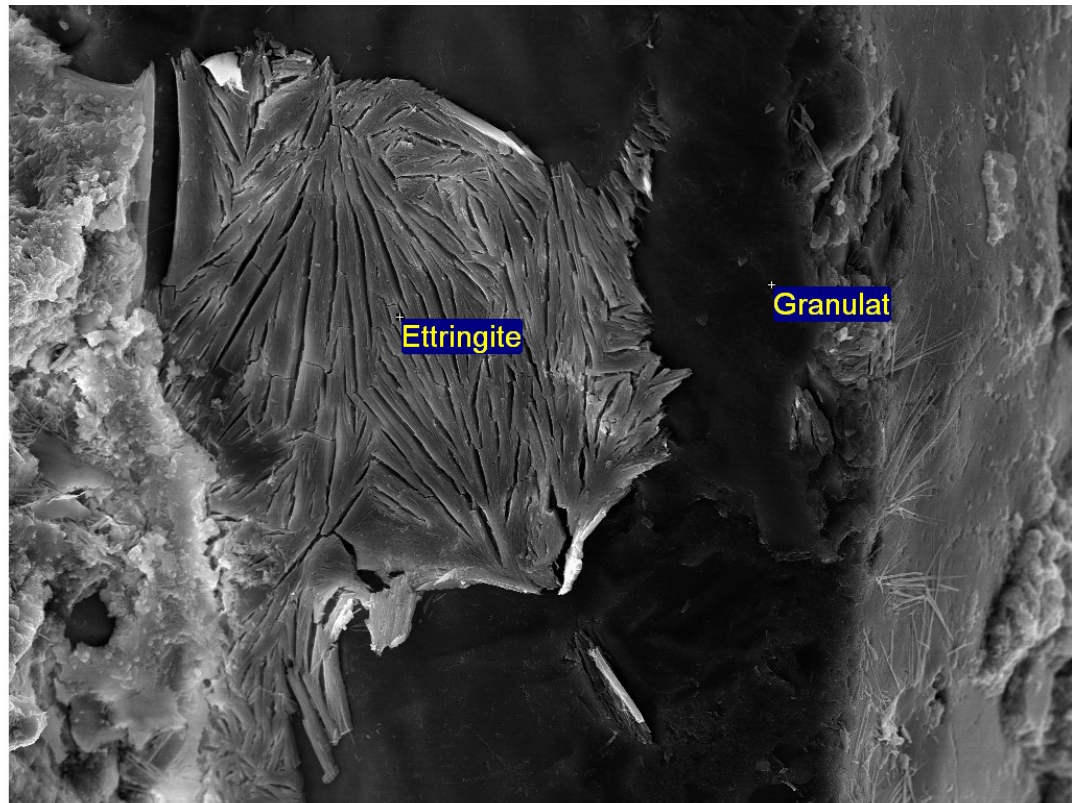


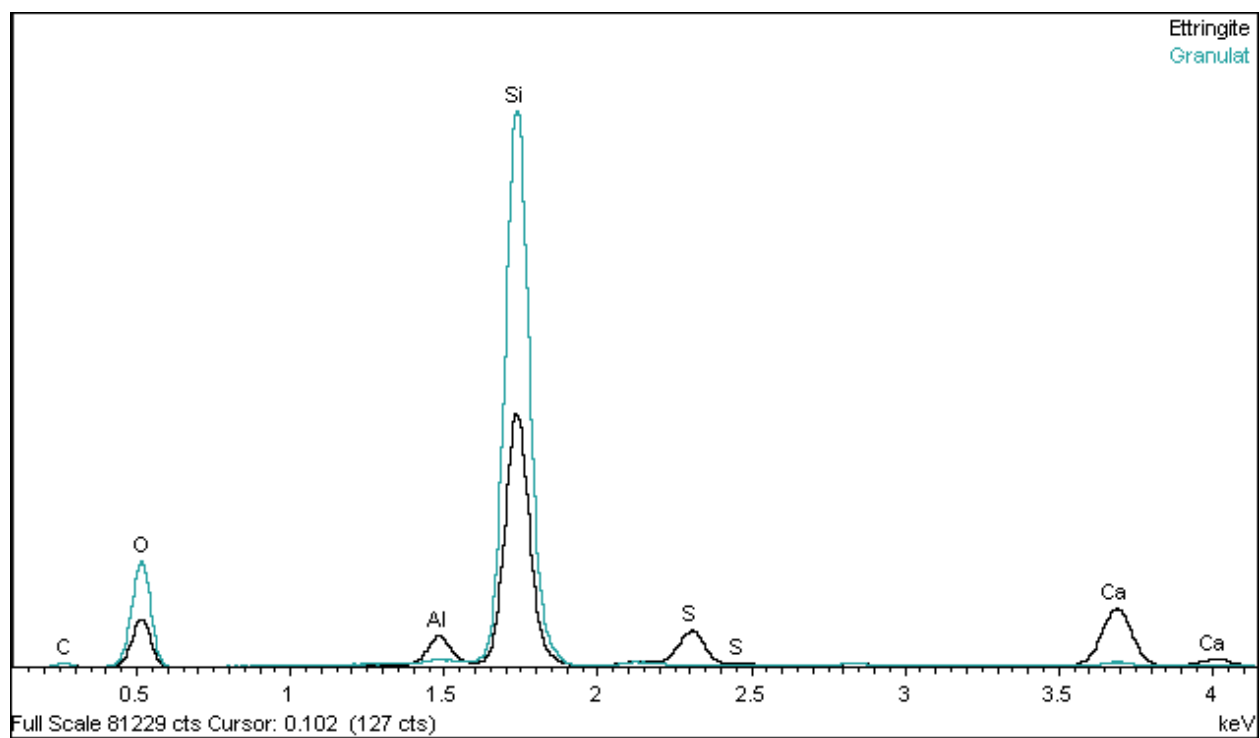
Figure 8.17 - Observation au microscope électronique à balayage d'un échantillon de l'éprouvette REF-CT2 à 34 semaines

- Spectre obtenu pour l'échantillon de l'éprouvette REF-CT2 par diffraction des rayons X du Microscope électronique à balayage à 44 semaines.



60µm

Electron Image 1



8.2 ANNEXE N°2 - RESULTATS DE L'ESSAI NIRAS POUR LES EPROUVETTES REF.

Date (jours)	PCT 1			PCT 2			PCT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
56	3330	0,0015	0,930	3340	0,0025	0,938	3280	0,0003	0,133
70	3345	0,0013	0,951	3360	0,0014	0,945	3300	0,002	0,935
112	3370	0,0008	0,862				3330	0,0011	0,950
133	3370	0,001	0,890	3390	0,0006	0,745	3330	0,0018	0,951
154	3380	0,0007	0,761	3390	0,0005	0,609	3335	0,0014	0,668
232	3400	0,0013	0,930	3410	0,0011	0,779	3360	0,0011	0,830
266	3400	0,0005	0,684	3410	0,0007	0,681	3360	0,0011	0,462
322	3410	0,0006	0,81	3420	0,0005	0,71	3370	0,0003	0,32

Date (jours)	CT 1			CT 2			CT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
56	3355	0,0011	0,894	3340	0,0005	0,870	3360	0,001	0,870
70	3370	0,0013	0,929	3360	0,0013	0,956	3380	0,0015	0,967
112	3395	0,001	0,940	3380	0,0009	0,657	3415	0,0011	0,950
133	3190	0,0017	0,950	3120	0,0036	0,992	3220	0,0009	0,409
154	3195	0,0029	0,980	3120	0,0055	0,969	3230	0,0029	0,981
232	1480	0,0317	0,749	2120	0,0794	0,934	2000	0,6267	0,146
266	1595	0,1588	0,942				1420	0,144	0,987
322	1700	0,1805	0,95	2200	0,1233	0,99	1460	0,1788	0,95

8.3 ANNEXE N°3 - RESULTATS DE L'ESSAI NRUS POUR LES EPROUVETTES REF.

Date (jours)	PCT 1			PCT 2			PCT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
64	9837	-0,0010	0,464	9706	-0,0019	0,701	9586	-0,0013	0,181
105	9910			9840	-0,0007	0,283	9800	0,0003	0,502
126	9850	0,0003	0,020	9790	-0,0001	0,005	9800	-0,0009	0,266
147	9920	0,0002	0,033	9820	-0,0003	0,073	9820	0,0003	0,073
168	9970	0,0000	0,001	9820	0,0001	0,021	9855	-0,0001	0,012
238	10025	0,0000	0,001	9900	-0,0005	0,275	9825	-0,0004	0,065

Date (jours)	CT 1			CT 2			CT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
64	9837	-0,0002	0,041	9785	-0,0010	0,223	9765	-0,0002	0,052
105	9900	0,0002	0,460	9800	-0,0002	0,203	9820	0,0008	0,928
126	9375	0,0011	0,310	9380	-0,0001	0,001	9275	-0,0006	0,081
147	9520	0,0000	0,001	9470	0,0007	0,278	9370	0,0000	0,000
168	9560	0,0001	0,009	9510	0,0003	0,133	9430	-0,0007	0,332
238	7000	0,0024	0,670	8100	0,0021	0,469	9340	-0,0002	0,041

8.4 ANNEXE N°4 - RESULTATS DE L'ESSAI NIRAS POUR LES EPROUVETTES RAS.

Date (jours)	PCT 1			PCT 2			PCT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
98	3235	0,0008	0,86	3190	0,0021	0,96	3190	0,0033	0,99
112	3250	0,0023	0,96	3190	0,0054	0,96	3210	0,0117	0,95
119	3250	0,0023	0,99	3190	0,0151	0,88	3230	0,0142	0,92
126	3250	0,0024	1,00	3190	0,0068	0,94	3225	0,0047	0,99
168	3280	0,0015	0,95	3225	0,0037	0,99	3250	0,0034	0,97
210	3270	0,0027	0,98	3195	0,0138	0,96	3265	0,0047	0,97
290	3280	0,0029	0,97	3210	0,0176	0,94	3260	0,0044	0,98
324	3290	0,0025	0,94	3210	0,0124	0,96	3270	0,0066	0,98

Date (jours)	CT 1			CT 2			CT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
98	3215	0,0024	0,97	3210	0,0013	0,94	3110	0,0038	0,99
112	3225	0,0049	0,95	3175	0,0035	0,81	3000	0,0584	0,91
119	3240	0,0071	0,87	3150	0,0051	0,89	3040	0,0327	0,79
126	3020	0,0101	0,98	2990	0,0113	0,96	2750	0,0294	0,96
168	3000	0,0082	0,99	2945	0,0047	0,75	2540	0,0234	0,99
210	2375	0,0528	0,98	2560	0,045	0,97	1860	0,0769	0,92
290	2100	0,057	0,99	2140	0,0685	0,99	1775	0,0795	0,99
324	2050	0,1329	0,88	2140	0,0451	0,93	1810	0,0893	0,94

8.5 ANNEXE N°5 - RESULTATS DE L'ESSAI NRUS POUR LES EPROUVETTES RAS.

Date (jours)	PCT 1			PCT 2			PCT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
106	9376	0,0006	0,30				9535	0,0004	0,25
119	9210	-0,001	0,23	8600	-0,002	0,41	9450	-0,0004	0,08
140	9200	0,00008	0,00	8620	-0,0002	0,03	9450	0,0012	0,40
161	9210	0,00008	0,00	8590	-0,0003	0,0309	9510	0,001	0,57
182	9225	0,0003	0,283	8580	-0,0020	0,3806	9560	0,000	0,1822
203	9280	-0,0008	0,342	8625	0,0003	0,0464	9590	0,000	0,0151
225	9350	-0,00003	0,0018	8680	0,0016	0,8269	9560	0,0004	0,0973
297	9370	0,0001	0,02	8710	0,0009	0,65	9620	0,0001	0,05

Date (jours)	CT 1			CT 2			CT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
106	9443	0,0003	0,19	9452	-0,00007	0,01	9381	0,003	0,88
119	9390	-0,00002	0,00	9340	-0,0008	0,26	9300	0,0012	0,93
140	8790	-0,0018	0,46	8650	0,0013	0,06	8760	-0,0006	0,08
161	7650	-0,0005	0,107	8670	0,0013	0,06	8100	-0,00003	0,00
182	5610	0,0006	0,681	8650	-0,0011	0,778	7810	-0,0004	0,369
203		-0,0106	0,565	8625	-0,0006	0,073		-0,0082	0,614
225				8675	-0,0012	0,4042	8050	-0,0042	0,7629
297				8750	-0,0025	0,66	7800	-0,0001	0,00

8.6 ANNEXE N°6 - RESULTATS DE L'ESSAI NIRAS POUR LES EPROUVETTES ESA.

Date (jours)	PCT 1			PCT 2			PCT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
28	3227	0,0028	0,96	3293	0,0029	0,86	3272	0,0023	0,95
57	3295	0,0030	0,98	3355	0,0021	0,97	3340	0,0011	0,94
79	3320	0,0013	0,88	3375	0,0020	0,95	3360	0,0011	0,94
120	3343	0,0025	0,90	3401	0,0022	0,97	3383	0,0010	0,89
127	3341	0,0018	0,94	3402	0,0024	0,98	3384	0,0011	0,95

Date (jours)	CT 1			CT 2			CT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
28	3270	0,0026	0,96	3269	0,0021	0,97	3216	0,0038	0,98
57	3335	0,0018	0,95	3315	0,0032	0,93	3280	0,0020	0,87
79	3350	0,0012	0,93	3345	0,0015	0,90	3305	0,0020	0,95
120	3377	0,0015	0,94	3369	0,0021	0,93	3331	0,0012	0,92
127	3147	0,0040	0,97	3190	0,0031	0,96	3162	0,0048	0,98

8.7 ANNEXE N°7 - RESULTATS DE L'ESSAI NRUS POUR LES EPROUVETTES ESA.

Date (jours)	PCT 1			PCT 2			PCT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
27	9710	-0,0003	0,07	9778	-0,0003	0,06	9781	-0,0003	0,09
51	9820	-0,0003	0,18	9890	0,0005	0,11	9860	-0,0018	0,56
92	9940	-0,0007	0,38	9970	0,0003	0,11	9960	0,0001	0,00
120	9993	0,0013	0,90	9987	0,0010	0,68	9978	0,0019	0,94
127	9936	0,0029	0,98	9983	0,0019	0,76	9917	0,0047	0,97

Date (jours)	CT 1			CT 2			CT 3		
	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²	f0 (Hz)	α	R ²
27	9741	-0,0005	0,28	9698	-0,0003	0,05	9715	-0,0005	0,31
51	9840	0,0001	0,02	9800	-0,0014	0,55	9790	-0,0013	0,53
92	9910	-0,0006	0,22	9940	0,0002	0,08	9910	-0,0013	0,70
120	9956	0,0008	0,71	9912	0,0014	0,79	9911	0,0026	0,98
127	9378	0,0031	0,98	9309	0,0014	0,65	9377	0,0023	0,92

8.8 ANNEXE N°8 - RESULTATS DES RESISTANCES A LA COMPRESSION AUX DIFFERENTES ECHEANCES.

Tableau 8.1 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 28 jours

	Référence (MPa)	RAS (MPa)	ESA (MPa)
Éprouvette 1	39,5	37,0	39,2
Éprouvette 2	40,1	40,1	36,9
Éprouvette 3	38,3	40,9	37,9
Moyenne	39,3	39,3	38,0

Tableau 8.2 - Résistance à la compression des échantillons de référence à 27 semaines

	Référence (MPa)	
	PCT	CT
Éprouvette 1	47,8	39,5
Éprouvette 2	48,8	41,4
Éprouvette 3	48,0	39,7
Moyenne	48,2	40,2

Tableau 8.3 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 34 semaines

	Référence (MPa)		RAS (MPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	47,3	33,4	41,9	15,1
Éprouvette 2			46,0	30,1
Éprouvette 3			42,5	30,1
Moyenne	47,3	33,4	43,5	25,1

Tableau 8.4 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 40 semaines

	Référence (MPa)		RAS (MPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	47,9	7,0*	44,8	10,0
Éprouvette 2	47,6	20,2	45,8	17,4
Éprouvette 3			45,6	11,6
Moyenne	47,8	13,6	45,4	13

* Valeur obtenue alors que l'éprouvette a été détruite lors de la mesure du module d'Young (E)

Tableau 8.5 - Résistance à la compression des échantillons de référence, RAS et ESA à 44 semaines

	Référence (MPa)		RAS (MPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	50,9	12,9	39,5	12,4
Éprouvette 2	49,1	29,8	41,1	12,4
Éprouvette 3			39,2	47,3*
Éprouvette 4			40,3	
Éprouvette 5			42,0	
Éprouvette 6			42,4	
Moyenne	50	21,4	40,8	12,4

* Valeur à prendre avec précautions compte tenu de son écart par rapport aux autres. Elle n'est pas prise en compte dans le calcul de la moyenne en fin de tableau.

8.9 ANNEXE N°9 - RESULTATS DES MODULES DE YOUNG AUX DIFFERENTES ECHEANCES.

Tableau 8.6 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 28 jours

	Référence (GPa)	RAS (GPa)	ESA (GPa)
Éprouvette 1	33,6	28,3	34,8
Éprouvette 2	33,0	30,8	32,7
Moyenne	33,3	29,6	33,8

Tableau 8.7 - Module d'Young des échantillons de référence à 27 semaines

	Référence (GPa)	
	PCT	CT
Éprouvette 1	36,1	31,7
Éprouvette 2	35,7	30,8
Moyenne	35,9	31,3

Tableau 8.8 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 34 semaines

	Référence (GPa)		RAS (GPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	36,8	22,3	29,7	8,4
Éprouvette 2			29,7	26,0
Moyenne	36,8	22,3	29,7	17,2

Tableau 8.9 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 40 semaines

	Référence (GPa)		RAS (GPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	36,8	1,8*	27,7	8,4
Éprouvette 2	36,4	10,3	28,5	5,8
Moyenne	36,6	6,1	28,1	7,1

* Valeur obtenue alors que l'éprouvette a été détruite lors de la mesure du module d'Young (E)

Tableau 8.10 - Module d'Young des échantillons de référence, RAS et ESA à 44 semaines

	Référence (GPa)		RAS (GPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	36,3	5,4	24,4	4,8
Éprouvette 2	37,6	17,0	30,3	33,3*
Éprouvette 3			23,0	
Éprouvette 4			26,5	
Moyenne	37	11,2	26,1	4,8

* Valeur à prendre avec précautions compte tenu de son écart par rapport aux autres. Elle n'est pas prise en compte dans le calcul de la moyenne en fin de tableau.

8.10 ANNEXE N°10 - RESULTATS DES RESISTANCES A LA TRACTION AUX DIFFERENTES ECHEANCES.

Tableau 8.11 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence, RAS et ESA à 28 jours

	Référence (MPa)	RAS (MPa)	ESA (MPa)
Éprouvette 1	3,67	3,76	4,32
Éprouvette 2	3,70	3,84	3,80
Éprouvette 3	3,43	3,61	3,77
Moyenne	3,6	3,7	3,9

Tableau 8.12 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence et RAS à 34 semaines

	Référence (MPa)		RAS (MPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	3,05	0,97	2,70	1,75
Éprouvette 2	4,27	0,73	2,91	1,92
Éprouvette 3			3,85	1,17
Moyenne	3,7	0,8	3,2	1,6

Dans le cas des éprouvettes RAS, deux valeurs extrêmes peuvent fausser la moyenne : 3,85 MPa pour PCT et 1,17 MPa pour CT. Le calcul des moyennes sans ces deux valeurs donne :

- RAS-PCT : 2,81 MPa
- RAS-CT : 1,84 MPa

La moyenne des valeurs des éprouvettes REF-PCT ne varie pas comparée à la moyenne à 28 jours. Cependant, la moyenne des éprouvettes REF-CT diminue grandement : passage de 3.6 MPa à 0,8 MPa (diminution de 78%).

Tableau 8.13 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence et RAS à 40 semaines

	Référence (MPa)		RAS (MPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	3,90	0,81	3,42	1,40
Éprouvette 2	4,87	0,94	3,94	1,58
Éprouvette 3			3,49	2,59
Moyenne	4,4	0,9	3,6	1,9

Tableau 8.14 - Résistance à la traction indirecte des échantillons de référence et RAS à 44 semaines

	Référence (MPa)		RAS (MPa)	
	PCT	CT	PCT	CT
Éprouvette 1	4,37	1,60	3,37	1,03
Éprouvette 2	4,42	0,78	3,09	0,86
Éprouvette 3			3,33	
Moyenne	4,4	1,2	3,3	0,9

8.11 ANNEXE N°11 – DETAILS DU CIMENT GU



CERTIFICAT DE CIMENT CEMENT TEST REPORT

04/10/2016

Page 1 / 1

GU - Ciment d'usage général

GU - General Use Cement

COLACEM CANADA, USINE de KILMAR / KILMAR PLANT

Moyenne mensuelle / Monthly Average : Sept 2016 / Sep. 2016

<u>Analyses Chimiques /</u> <u>Chemical analyses</u>	<u>Résultats (%)</u> <u>Results (%)</u>	<u>Essais Physiques /</u> <u>Physical Tests</u>	<u>Résultats</u> <u>Results</u>
PAF / LOI ($\leq 3.5\%$)	3,0	<u>Finesse</u> <u>Fineness</u>	
Résidu insoluble/ Insoluble residue ($\leq 1.5\%$)	0,5	Blaine (M^2/kg)	349
Chaux libre Free lime	1,2	Passant/Passing $45\mu m$ (%) ($\approx 72\%$)	91
Alcalis (Na_2O_{eq}) Alkalies	0,54	<u>Temps de prise (minutes)</u> <u>Setting time</u>	
SiO ₂	19,6	Initial (45 ~ 375 min)	130
Al ₂ O ₃	4,5	Final	225
Fe ₂ O ₃	3,1	<u>Résistance à la compression</u> <u>Compressive Strength (MPa)</u>	
CaO	62,6	3 jours/days ($\approx 14.5 MPa$)	22.1
MgO ($\leq 5.0\%$)	1,7	7 jours/days ($\approx 20.0 MPa$)	28.0
Na ₂ O	0,14	28 jours/days ($\approx 20.5 MPa$)	38.5
K ₂ O	0,60		(08/2016)
SO ₃ ($\leq 3.0\%$)	2,8	<u>Expansion à l'autoclave (%)</u> <u>Autoclave expansion ($\leq 1.0\%$)</u>	0.05
<u>Composition minéralogique</u> <u>Mineralogical composition</u>		<u>Teneur en air du mortier (%)</u> <u>Air content of mortar</u>	7.0
C ₃ S (Silicate tricalcique / Tricalcium silicate)	52,3		
C ₂ S (Silicate bicalcique / Dicalcium silicate)	16,8		
C ₃ A (Aluminate tricalcique / Tricalcium aluminate)	6,7		
C ₄ AF (Aluminoferrite tétracalcique / Tetracalcium Aluminoferrite)	9,5		

Superviseur de Qualité / Quality Supervisor

Notes:

- Par ce certificat d'analyse, nous attestons et certifions que le ciment ci-dessus respecte les exigences chimiques et physiques de la norme CSA - A3001-13. / We certify that the above described cement meets the chemical and physical requirements of the CSA- A3001-13 Norm.
- Les valeurs rapportées ci-dessus sont basées sur la moyenne mensuelle des résultats d'analyses d'échantillons pris dans la production et l'expédition du ciment. / The content of this document is based on the monthly average of the testing results of the samples taken from production and shipments.
- Pour toute information supplémentaire concernant ce rapport d'analyse, veuillez contacter le service technique au 819 242-4312 poste (217). / For more information concerning this report, please communicate with the technical service at (819) 242-4312 Ext (217).